



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

**FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA
ENSAYOS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR:

YAMBOMBO GUANUTAXI JAVIER GUSTAVO

TUTOR: ING. MILTON SILVA

QUITO – ECUADOR

2012

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi padre Luis Yambombo quién con sacrificio y esfuerzo estuvo siempre apoyándome incondicionalmente en la terminación de la vida estudiantil, quien me enseñó a vivir con respeto, honestidad y disciplina.

A mis queridos hermanos, Elena, Paúl, Oscar, Diego y Jomaira por brindarme su apoyo y cariño en cada momento de mi vida.

A Carolina quién con su paciencia, respeto y amor fue parte esencial para la culminación de mis estudios, y especialmente a mi querido hijo Elkin quien con su presencia alegró mi vida e inspiró deseos de superarme cada día más.

A toda mi familia, amigos y compañeros quienes estuvieron a mi lado en alegrías y tristezas durante la vida universitaria.

Javier Gustavo Y.

AGRADECIMIENTO

A Dios todo poderoso, por brindarme vida y la oportunidad de culminar mis estudios.

A mis padres Luis y Zoila quienes han sabido guiarme por el camino de la sabiduría y saber distinguir entre lo bueno y lo malo. A mis hermanos y a todos los que forman parte de la familia Yambombo Guanutaxi cuyo único anhelo fue verme lleno de éxitos en la Universidad Central del Ecuador.

A mis tíos Mercedes y Miguel por el apoyo incondicional durante toda mi vida estudiantil.

Este trabajo se realizó gracias a la colaboración del director del laboratorio de hidráulica Ing. Milton Silva para quien un profundo agradecimiento y mi más sincero sentido de estima y consideración a cada uno de mis profesores de mi querida escuela de Ingeniería Civil.

Javier Gustavo Y.

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL.

Yo, Yambombo Guanutaxi Javier Gustavo, en calidad de autor del trabajo de investigación o tesis realizada sobre **“Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios”**, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Quito, 24 de Agosto del 2012.



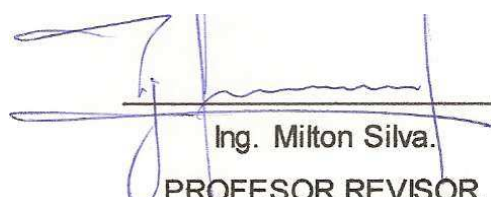
Javier Yambombo G.

CC: 020197013-4

CERTIFICACIÓN

En calidad de Revisor del Proyecto de Investigación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, Presentado y desarrollado por el señor YAMBOMBO GUANUTAXI JAVIER GUSTAVO para aprobar el tema del trabajo de graduación, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, considero, que el proyecto reúne los requisitos necesarios.

En la ciudad de Quito, a los 24 días del mes de Agosto del 2012.



Ing. Milton Silva.
PROFESOR REVISOR.
TUTOR

INFORME SOBRE LA CULMINACIÓN DE LA TESIS

Tema: **“Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios.”**

Tutor: Ing. Milton Silva

Fecha: 24 de agosto de 2012

Antecedentes

Director de la Carrera de Ingeniería Civil solicita el informe el temario de tesis **“Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios”** presentado por el señor YAMBOMBO GUANUTAXI JAVIER GUSTAVO y aprobada por el H. Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática en el mes de Mayo del 2012, en base al informe favorable del Ing. Milton Silva AUTORIZA la correspondiente denuncia.

Desarrollo de la Tesis

Primero se procede a la recopilación de la información del banco hidráulico existente en el laboratorio de hidráulica de la escuela de Ingeniería Civil.

De acuerdo con los materiales que se disponen en el mercado nacional se procede con el análisis y diseño del equipo.

Para seleccionar la bomba centrífuga se hizo un análisis de las diferentes trayectorias por donde circulara el agua con la finalidad de determinar el caso más desfavorable, es decir, la trayectoria por donde se presentan las mayores pérdidas de energía.

Con los planos realizados en la etapa de diseño se procedió a la construcción tanto del banco hidráulico como del tablero de pruebas.

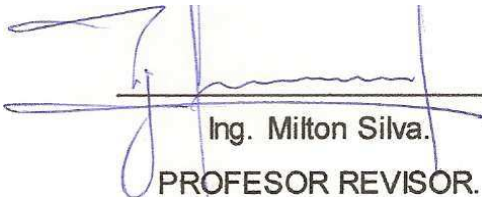
Bajo la supervisión del Ing. Milton Silva y con el ayudante encargado del laboratorio de hidráulica se puso en funcionamiento el equipo y posteriormente se realizó la práctica correspondiente a pérdidas de carga por fricción de tubería y por accesorios.

Conclusiones

- ✓ Se cumplió el objetivo principal que era diseñar y construir un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios.
- ✓ Una vez realizado las prácticas se concluye que las mayores pérdidas de carga se obtienen en la tubería de Hierro Galvanizado, en comparación con las tuberías de PVC y Cobre, ratificando con ello que las pérdidas por fricción de tubería (h_f) depende del material con que está construida la tubería, el estado en que está la misma (nueva, usada o muy usada).
- ✓ El orden de las válvulas que presentan la mayor pérdida de carga en función del coeficiente de resistencia K es la siguiente: válvula de globo ($K = 7.40$) seguida de la válvula de retención ($K = 1.99$), y por último la válvula de bola ($K = 1.53$) lo que concuerda con el criterio de clasificación que dan los manuales de hidráulica.

Por lo manifestado anteriormente ratifico la aceptación del trabajo de graduación realizado y recomiendo proseguir el trámite respectivo hasta la graduación del ejecutor.

Atentamente,



Ing. Milton Silva.
PROFESOR REVISOR.
TUTOR



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA
SECRETARÍA

RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

CARRERA DE Ingeniería Civil

Quito, 14 de Septiembre 2012

Señor YAMBOMBO GUANUTAXI JAVIER GUSTAVO

Tema: "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE
PERIODOS DE CARGA EN TUBERIAS Y ACCESORIOS"

CALIFICACIÓN:

TRIBUNAL	PROFESOR (A)	NOTA SOBRE VEINTE		FIRMA
		NUMERO	LETRAS	
PROFESOR TITULAR	M ^r . JORGE ZURITA B.	18	DIEZ Y OCHO	
PROFESOR TITULAR	Prof. MARCELO HIDALGO BEVALCAZAR	19	DIEZ Y NUEVE	
PROMEDIO		18.5	DIEZ OCHO COMO CINCO	

Dra. Katheryne Carrión Valdivieso
SECRETARIA ABOGADA (E)

CONTENIDO

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	2
1.4 Objetivos de la tesis.....	3
1.4.1 Objetivos generales	3
1.4.2 Objetivos específicos	3

CAPÍTULO II. TEORÍA DEL FLUJO DE FLUIDOS EN TUBERÍAS

2.1 Introducción	4
2.2 Fluidos	5
2.3 Propiedades Físicas de los fluidos.....	5
2.3.1 Densidad.....	5
2.3.2 Peso específico.....	5
2.3.3 Densidad relativa	6
2.3.4 Viscosidad.....	6
2.3.4.1 Viscosidad Absoluta o Dinámica.....	6
2.3.4.2 Viscosidad Cinemática.....	7
2.4 Caudal	8
2.5 Ecuación de continuidad.....	8
2.6 Presión.....	9
2.7 Ecuación general de energía.	11
2.7.1 Teorema de Bernoulli.....	12
2.7.2 Pérdidas de energía en un sistema a presión de un flujo incompresible.....	13
2.8 Regímenes de Flujo de fluidos en tuberías.....	15
2.8.1 Flujo Laminar	15
2.8.2 Flujo Turbulento	16
2.9 Número de Reynolds	16

2.10 Pérdidas de carga por fricción en tuberías.....	17
2.10.1 Ecuación de Darcy-Weisbach	17
2.10.1.1 Coeficiente de fricción (f).	18
2.10.1.2 Rugosidad Relativa	20
2.10.2 Ecuación de Hazen-Williams	22
2.10.2.1 Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, C	23
2.11 Pérdidas de carga por accesorios.....	24
2.11.1 Ecuación fundamental de las pérdidas de carga por accesorios. .	24
2.11.2 Pérdidas de carga en piezas especiales.....	27
2.11.2.1 Ampliación Brusca	27
2.11.2.2 Contracción Brusca.....	28
2.11.2.3 Expansión gradual	29
2.11.2.4 Contracción gradual.....	31
2.11.2.5 Pérdida por entrada	32
2.11.2.6 Pérdida en la salida de tubería	32
2.12 Longitud de tubería equivalente.....	33
2.13 Tipos de Válvulas.....	33
2.13.1 Válvulas de Compuerta.....	34
2.13.2 Válvulas de Globo	34
2.13.3 Válvulas de Bola o esférica.....	35
2.13.4 Válvulas de Retención (Check).....	36
2.13.5 Válvula de pie con alcachofa o colador.....	36
2.14 Bombas y sistemas de bombeo	37
2.14.1 Bombas.....	37
2.14.2 Clasificación de bombas	38
2.14.3 Bombas Centrífugas.	39
2.14.4 Elementos constitutivos de las bombas centrífugas	40
2.15 Potencia que requieren las bombas.....	41
2.15.1 Altura efectiva de bombeo	41
2.15.1.1 Altura estática (H_o)	42
2.15.1.2 Altura de presión (P)	43

2.15.1.3 Altura de velocidad $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$	43
2.15.1.4 Pérdidas por fricción de tubería y por accesorios $\sum(h_f+h_m)$	43
2.16 Potencia que requieren las bombas.....	43
2.16.1 Cavitación	45
2.16.2 Velocidad específica	46
2.16.3 Leyes de afinidad.....	47
2.17 Curvas características de una bomba.....	48
2.17.1 Curva de operación del sistema.....	48
2.17.2 Punto de operación	49

CAPITULO III. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

3.1 Introducción	51
3.2 Partes del banco de pruebas	53
3.3 Velocidad mínima en tuberías.....	54
3.4 Velocidad máxima en tuberías.....	54
3.5. Condiciones y fluido en las que va a trabajar el equipo.	55
3.6. Determinación de la curva de operación sistema.	55
3.6.1 Trayectoria 1	56
3.6.2 Trayectoria 2	61
3.6.3 Trayectoria 3	63
3.6.3 Trayectoria 4	64
3.6.5 Trayectoria 5	66
3.6.5 Trayectoria 6	67
3.6.5.1 Método de Hardy-Cross	68
3.7 Resumen de curvas de operación del sistema.	76
3.8 Selección de la bomba.....	77
3.8.1 Cálculo de la potencia de la bomba	77
3.8.2 Curva de característica de la bomba.	78
3.8.3 Punto de operación.....	79
3.9 Tanque de almacenamiento.....	83

3.10 Tiempo de vaciado del tanque de almacenamiento	84
3.11 Selección de manómetros.....	85

CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

4.1 Introducción	88
4.2 Construcción del banco Hidráulico.....	88
4.2.1 Materiales utilizados en la construcción del banco hidráulico	89
4.2.2 Herramientas en la construcción del banco hidráulico	89
4.2.3 Proceso constructivo del banco hidráulico	90
4.3 Construcción del tablero de pruebas	91
4.3.1 Materiales utilizados en la construcción del tablero de pruebas	92
4.3.2 Herramientas para la construcción del tablero de pruebas.	93
4.3.3 Proceso de constructivo del tablero de pruebas.	93

CAPÍTULO V. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL BANCO HIDRAULICO

5.1 Introducción.	95
5.2 Ensayo 1. Coeficiente de rozamiento en tuberías.....	97
5.2.1 Objetivos.	97
5.2.2 Descripción del ensayo.....	97
5.2.3 Cálculo de resultados.	98
5.3 Ensayo 2. Pérdidas de energía en accesorios.....	99
5.3.1 Objetivos.	99
5.3.2 Descripción del ensayo.....	99
5.3.3 Cálculo de resultados.	99
5.4 Análisis de Resultados.....	102

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE COSTOS

6.1 Introducción	103
6.2 Costos Directos.....	103

6.3 Costos Indirectos	105
6.4 Costos Total.....	105
6.5 Análisis de costos por operación y mantenimiento	106

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones	108
7.2 Recomendaciones	109
BIBLIOGRAFIA	110

LISTA DE ANEXOS

Anexo N°1	Diagrama universal de Moody
Anexo N°2	Propiedades físicas del agua
Anexo N°3	Presión atmosférica a diferentes altitudes sobre el nivel del mar
Anexo N°4	Tensión del vapor de agua
Anexo N°5	Fotos del Banco de Pruebas
Anexo N°6	Plano y detalles constructivos del Banco de Pruebas

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1. Viscosidad Cinemática.....	8
Tabla N° 2. Condiciones de flujo según Reynolds ...	17
Tabla N° 3. Rugosidad absoluta (ϵ) en tubos comerciales.....	21
Tabla N° 4. Coeficientes de C para la fórmula de Ha zen- Williams	23
Tabla N° 5. Resistencia accesorios expresada en longitud equivalente en número de diámetros de tubería (L_e/D).	25
Tabla N° 6. Factor de fricción (f_T) en la zona de turbulencia completa para tubería comercial.	26
Tabla N° 7. Coeficiente de resistencia - contracción brusca.....	29
Tabla N° 8. Coeficiente de resistencia - expansión gradual.....	30
Tabla N° 9. Clasificación de las bombas centrífugas según la velocidad específica.....	47
Tabla N° 10. Características físicas y mecánicas de Tuberías	52
Tabla N° 11. Límites máximos de velocidad para conductos a presión. ...	54
Tabla N° 12. Pérdidas de energía por fricción de tubería - trayectoria 1 .	58
Tabla N° 13. Pérdidas de energía por accesorios - trayectoria 1.....	59
Tabla N° 14. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 1	60
Tabla N° 15. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 2	62
Tabla N° 16. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 3	63
Tabla N° 17. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 4	65
Tabla N° 18. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 5	66
Tabla N° 19. Cálculo de redes cerradas por el método iterativo de Hardy-Cross	71
Tabla N° 20. Pérdidas de energía por fricción de tubería - trayectoria 6 .	74
Tabla N° 21. Pérdidas de energía por accesorios - trayectoria 6.....	74

Tabla N° 22. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 6	75
Tabla N° 23. Resumen de curvas de operación del sistema	76
Tabla N° 24. Características generales de la bomba TEMCO modelo JSW/10H.....	79
Tabla N° 25. Partes del tablero de pruebas	91
Tabla N° 26. Determinación del coeficiente de pérdidas por fricción de tubería (f).	101
Tabla N° 27. Determinación del coeficiente de resistencia “K” y longitud equivalente “Le/Di” para diferentes accesorios.....	101
Tabla N° 28. Costo de materiales utilizados	103
Tabla N° 29. Costos de mano de obra e instalación	105
Tabla N° 30. Costos de Indirectos	105
Tabla N° 31. Costo Total.....	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1. Ecuación de continuidad	9
Gráfico N° 2. Relación entre las presiones	10
Gráfico N° 3. Balance energético en instalación hidráulica.....	12
Gráfico N° 4. Pérdidas de energía en un sistema a presión.	14
Gráfico N° 5. Flujo laminar	15
Gráfico N° 6. Flujo turbulento.....	16
Gráfico N° 7. Rugosidad exagerada de la pared de un tubo.....	21
Gráfico N° 8. Modificación del coeficiente de rugosidad	23
Gráfico N° 9. Esquema de una ampliación Brusca	27
Gráfico N° 10. Esquema de una contracción Brusca ..	28
Gráfico N° 11. Esquema de una expansión Gradual. ...	30
Gráfico N° 12. Esquema de una expansión Gradual. ...	31
Gráfico N° 13. Coeficiente de resistencia – contracción gradual con $\theta \geq 15^\circ$	31
Gráfico N° 14. Coeficiente de pérdidas de carga por entrada.....	32
Gráfico N° 15. Esquema una salida de tubería.....	33
Gráfico N° 16. Esquema una salida de tubería.....	34
Gráfico N° 17. Válvula de globo.....	35
Gráfico N° 18. Válvula de bola.....	35
Gráfico N° 19. Válvula de retención (check) convencional.	36
Gráfico N° 20. Válvula de retención (check) en Y.	36
Gráfico N° 21. Válvula de pie con colador, tipo disco de vástago.....	37
Gráfico N° 22. Válvula de pie con colador, tipo disco de bisagra.....	37
Gráfico N° 23. Parte de las Bombas	38
Gráfico N° 24. Elementos constitutivos de una bomba centrífuga.	40
Gráfico N° 25. Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de energía.....	41
Gráfico N° 26. Bomba por encima de la succión. ...	42
Gráfico N° 27. Bomba por debajo de la succión. ...	43
Gráfico N° 28. Detalle de la línea de succión de la bomba y definición de términos NPSH	46

Gráfico N° 29. Curva característica de una bomba..	48
Gráfico N° 30. Curvas características de operación del sistema.	49
Gráfico N° 31. Punto de operación de una bomba.... ..	49
Gráfico N° 32. Plano tridimensional de banco de pruebas.....	53
Gráfico N° 33. Trayectoria 1 del sistema.	57
Gráfico N° 34. Curva de operación del sistema - trayectoria 1	61
Gráfico N° 35. Trayectoria 2 del sistema.	61
Gráfico N° 36. Curva de operación del sistema - trayectoria 2	62
Gráfico N° 37. Trayectoria 3 del sistema.	63
Gráfico N° 38. Curva de operación del sistema - trayectoria 3.	64
Gráfico N° 39. Trayectoria 4 del sistema.	64
Gráfico N° 40. Curva de operación del sistema - trayectoria 4.	65
Gráfico N° 41. Trayectoria 5 del sistema.	66
Gráfico N° 42. Curva de operación del sistema - trayectoria 5.	67
Gráfico N° 43. Trayectoria 6 del sistema.	67
Gráfico N° 44. Circuito cerrado para análisis de redes de tuberías.	69
Gráfico N° 45. Curva de operación del sistema – trayectoria 6.	75
Gráfico N° 46. Resumen de curva de operación del sistema.....	76
Gráfico N° 47. Bomba TEMCO modelo JSW/10H	78
Gráfico N° 48. Curva Características - bomba TEMCO modelo JSW/10H	79
Gráfico N° 49. Punto de operación - trayectoria 1	80
Gráfico N° 50. Punto de operación - trayectoria 2	80
Gráfico N° 51. Punto de operación - trayectoria 3	81
Gráfico N° 52. Punto de operación - trayectoria 4	82
Gráfico N° 53. Punto de operación - trayectoria 5	82
Gráfico N° 54. Punto de operación - trayectoria 6	83
Gráfico N° 55. Corte longitudinal del tanque de almacenamiento.....	84
Gráfico N° 56. Esquema de ubicación de la tubería de desagüe.....	84
Gráfico N° 57. Coeficiente de descarga..... ..	85
Gráfico N° 58. Presión en manómetros.	86
Gráfico N° 59. Partes del banco hidráulico	88

Gráfico N° 60. Partes del banco hidráulico	91
Gráfico N° 61. Tablero de pruebas	95
Gráfico N° 62. Manómetro de agua.	96
Gráfico N° 63. Sistema de aforo del banco de pruebas.	97
Gráfico N° 64. Conexión de mangueras de manómetro de agua con tomas de presión.	97

RESUMEN

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS

Se construyó y se instalo el equipo mencionado, en el laboratorio de hidráulica de la escuela de Ingeniería Civil. Este equipo consta de dos partes:

El primero, un tablero de pruebas que cuenta con 4 ramales horizontales de tuberías de diferente a material (PVC, HG, cobre) más un ramal compuesta por diferentes accesorios acopladas en serie, el agua es impulsada a con la ayuda de una bomba centrífuga. La medición de presión se realiza por medio de un manómetro de agua colocando a la entrada y salida de cualquier tramo de tubería o accesorio.

El segundo, un banco hidráulico compuesto de un tanque de almacenamiento y un sistema de dos tanques provisionales que previa la alineación de las palancas permite realizar aforos para determinar el caudal que circula por cualquiera de los ramales del tablero de pruebas.

DESCRIPTORES:

BANCO HIDRÁUICO / ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA / PÉRDIDAS DE CARGA / LONGITUD DE TUBERÍA EQUIVALENTE / BOMBAS CENTRÍFUGAS / TABLERO DE PRUEBAS

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TEST BENCH FOR TESTING OF LOSSES IN PIPES AND ACCESSORIES

It was built and installed the equipment listed in the Hydraulics Laboratory School of Civil Engineering. This equipment consists of two parts:

First, a test panel which has horizontal branches 4 different pipe materials (PVC, HG, copper) plus a branch composed of different accessories coupled in series, the water is driven with the aid of a centrifugal pump. The pressure measurement is made by placing a water manometer at the entrance and exit of any pipe section or accessory.

The second, a bank composed of a hydraulic storage tank and a two-tank system prior provisional alignment gauging levers allows to determine the flow rate through either of the branches of the test panel.

DESCRIPTORS:

HIDRÁUICO BANK / GENERAL POWER EQUATION / LOSSES /
EQUIVALENT PIPING LENGTH / CENTRIFUGAL PUMPS / BOARD
TEST

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios, es parte de un sistema de equipos necesario para realizar prácticas dentro de la formación del Ingeniero Civil especialmente en el campo de la Ingeniería Hidráulica.

Actualmente este ensayo es posible realizarlo en un equipo que dispone el laboratorio, pero debido a la demanda de estudiantes que se tienen especialmente en los cursos inferiores donde se dictan la cátedra de Hidráulica, hace necesario proveer de otro equipo para su correcto entendimiento del fenómeno que se analiza en esta práctica.

Con la presente tesis se busca satisfacer las necesidades que tienen los estudiantes para justificar la parte teórica que reciben dentro de la asignatura de hidráulica y permitir palpar lo que realmente sucede en un sistema hidráulico.

Se analizara en el diseño dos factores que se contradicen entre sí. Por un lado esta el diámetro de la tubería, el cual debe mantenerse al mínimo para reducir el costo de instalación, y por la otra parte conviene que el diámetro sea grande para reducir la fricción y por ende el costo de bombeo. A demás se incorporaran elementos de medición, como Manómetros, y otros elementos restringidores de caudal como válvulas para así poder controlar o decidir el recorrido que atravesará el fluido en su paso por el sistema diseñado.

Mediante el diseño y posterior construcción de este equipo, los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, dictada en la Facultad de

Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador podrán enriquecer sus conocimientos y observar el comportamiento del fenómeno, lo que será de gran utilidad en su posterior desempeño profesional.

Se debe considerar que el tema tratado en esta tesis es un gran apoyo para el desarrollo de las prácticas que se desarrollan en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil y también esta dirigido hacia el mejoramiento de las instalaciones del laboratorio en cuestión.

Otro aspecto importante que se debe considerar en el diseño, es el costo de fabricación para lo cual se incluirán los costos relacionados con la construcción del equipo.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente los estudiantes de la Universidad Central del Ecuador cuenta con un equipo (de banco de pruebas para ensayos de pérdidas carga por fricción de tuberías y por accesorios), pero debido a la demanda de estudiantes que se tiene en los cursos inferiores donde se recibe la cátedra de hidráulica I y II hace necesario de proveer de otro equipo para realizar dichas prácticas y no generar vacíos en la formación integral del futuro profesional.

1.3. Justificación

El propósito de éste trabajo es diseñar y construir un banco hidráulico, con su respectivo tablero de pruebas provistas de un sistema de tuberías colocadas en paralelo, variando no solo el diámetro de tubería sino también el material (PVC, hierro galvanizado, cobre,) con el propósito de comparar resultados y además consta de un ramal que permitirá analizar las pérdidas de carga generada por diferentes válvulas o accesorios.

Además con la realización del presente trabajo de graduación no será beneficiado solo el egresado, sino que también beneficiara a las futuras

promociones y al equipamiento del laboratorio de hidráulica de la escuela de ingeniería civil.

1.4 Objetivos de la tesis.

1.4.1 Objetivos generales

1. Diseñar y construir un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías de diferente material y accesorios.
2. Implementar en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador el equipo mencionado.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Investigar los métodos de cálculo para determinar la potencia de la bomba necesaria con el fin de garantizar circulación del agua por cualquier ramal de tuberías.
2. Realizar un análisis de costos del banco hidráulico con su respectivo tablero de pruebas.
3. Determinar experimentalmente el coeficiente de fricción para las diferentes tuberías propuestas en el tablero de pruebas.
4. Determinar experimentalmente el coeficiente de resistencia para los diferentes accesorios y válvulas propuestas en el tablero de pruebas.

CAPÍTULO II

TEORÍA DEL FLUJO DE FLUIDOS EN TUBERÍAS

2.1 Introducción

A menudo, se enfrenta la tarea de diseñar sistemas para fluidos como redes de tuberías y su cálculo debe realizarse en base a las pérdidas incurridas cuando un fluido fluye a través de cañerías, válvulas, uniones, codos y otros elementos, así como también el comportamiento que adquirirá el fluido en su recorrido con respecto a las variantes asociadas a él.

En la elección de un diámetro para el transporte de fluidos, intervienen dos factores que se contradicen entre sí. Por un lado está el tamaño del conducto, el cual debe ser mantenido en el mínimo para reducir el costo de instalación, y por la otra parte conviene que el ducto sea grande para reducir la fricción y por ende el costo de bombeo.

Muy pocos problemas especiales de mecánica de fluidos, como es el caso del flujo en régimen laminar por tuberías, pueden ser resueltos por métodos matemáticos convencionales; todos los demás problemas necesitan métodos de resolución basados en coeficientes determinados experimentalmente.

Muchas fórmulas empíricas han sido propuestas como soluciones a diferentes problemas de flujo de fluidos por tuberías, pero son muy limitadas y pueden aplicarse únicamente cuando las condiciones del problema se aproximan a las condiciones de los experimentos de los cuales derivan las fórmulas. Debido a la gran variedad de fluidos que se utilizan en los procesos industriales modernos, una ecuación que pueda ser usada para cualquier fluido ofrece ventajas obvias. Una ecuación de este tipo es la fórmula de Darcy, que puede ser deducida por análisis

dimensional; sin embargo, una de las variables en la fórmula, el coeficiente de fricción, debe ser determinado experimentalmente. Esta fórmula tiene una extensa aplicación en el campo de la mecánica de fluidos y se utiliza mucho en este estudio.

2.2 Fluidos

Los fluidos son sustancias que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar cuán pequeño sea este esfuerzo. Una fuerza cortante es el componente de fuerza tangente a una superficie, y esta fuerza dividida por el área de la superficie es el esfuerzo cortante promedio sobre el área.

2.3 Propiedades Físicas de los fluidos

La ingeniería de mecánica de fluidos se ha desarrollado mediante el entendimiento de las propiedades de los fluidos, la aplicación de las leyes básicas de la mecánica y termodinámica.

2.3.1 Densidad

La densidad de un fluido se define como la cantidad de masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde: ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)

m = Masa (kg)

V = Volumen de la sustancia (m^3)

2.3.2 Peso específico

El peso específico de un fluido es el peso por unidad de volumen. Éste cambia con la gravedad, la cual depende del lugar de localización del producto.

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Donde: γ = Pesos específico del fluido (N/m^3)

ρ = Densidad de la sustancia (kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

2.3.3 Densidad relativa

La densidad relativa de una sustancia es un número adimensional que viene dado por la relación entre su peso y el peso de un volumen igual de agua en condiciones normales. También se puede expresar como la relación entre su densidad o peso específico y la del agua.

$$Dr = \frac{\rho_{\text{sustancia}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{Y_{\text{sustancia}}}{Y_{\text{agua}}}$$

El agua en condiciones normales la temperatura (20°C), la densidad (1000 kg/m^3) y una presión absoluta (760mm de Hg).

2.3.4 Viscosidad

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a fluir, como resultado de la interacción y cohesión de sus moléculas. La viscosidad se produce por el efecto de corte o deslizamiento resultante del movimiento de una capa de fluido con respecto a otro y es completamente distinta de la atracción molecular.

La ley de viscosidad de Newton establece que para una tasa dada de deformación angular del fluido, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad

$$T = u \frac{du}{dy}$$

Donde, u tiene las dimensiones FL^{-2}T .

2.3.4.1 Viscosidad Absoluta o Dinámica

Es la propiedad del fluido y expresa la resistencia al corte ofrecido por el fluido cuando se mueve. La viscosidad dinámica es directamente

proporcional a la tensión de cortadura, e inversamente proporcional a la velocidad angular.

$$u = \frac{T}{du/dy}$$

Donde: u = Viscosidad absoluta (N.s/m²) o [kg/(m.s)]

T = Tensión de cortadura (N) o (kg)

2.3.4.2 Viscosidad Cinemática

Es la viscosidad absoluta dividida entre la densidad. En el sistema internacional (SI) la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo (m²/s)

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde: v = Viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

μ = Viscosidad dinámica o absoluta del fluido (Kg.s/m²)

ρ = Densidad del fluido (kg.s/m⁴)

En los líquidos cuando la temperatura aumenta la viscosidad disminuye, a la inversa, en tanto en los gases, si la temperatura aumenta la viscosidad también aumenta. El efecto de la presión sobre la viscosidad de los líquidos y la de los gases perfectos es tan pequeño que no tiene interés práctico en la mayor parte de problemas para flujo de fluidos.¹

La viscosidad cinemática para el agua, en función de la temperatura esta dado por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{0.000001771}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2}$$

Donde: v = Viscosidad cinemática (m²/s)

¹ Tomado de "Manual de Mecánica de fluidos", Ing. Silva Milton, Pág. 119

T = Temperatura del agua (°C)

En la tabla N° 1 se expone algunos valores de viscosidad cinemática calculada con la ecuación anterior.

Tabla N°1. Viscosidad Cinemática

T (°C)	ν (m ² /s) *10 ⁻⁰⁶	T (°C)	ν (m ² /s) *10 ⁻⁰⁶
0	1.77100	20	1.00488
2	1.65780	22	0.95814
4	1.55578	24	0.91473
6	1.46345	26	0.87431
8	1.37956	28	0.83661
10	1.30307	30	0.80139
12	1.23309	32	0.76843
14	1.16889	34	0.73752
15	1.13874	36	0.70851
16	1.10980	38	0.68123
18	1.05529	40	0.65554

2.4 Caudal

Es el volumen por unidad de tiempo que atraviesa una sección transversal de un conducto. Se pueden relacionar el caudal (Q) con la velocidad (v) a través del área transversal de flujo (A)

$$Q = A.v$$

Unidades frecuentes de caudal: m³/s, lt/s, GPM

2.5 Ecuación de continuidad

Esta ecuación se basa principalmente en el Principio de conservación de la Masa, es decir la materia que entra es la misma que la que sale.

La ecuación de continuidad para los líquidos considera que el caudal será constante para las diferentes secciones de una instalación por la que atraviese el fluido.

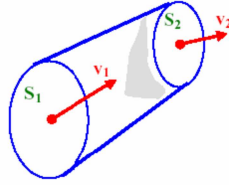


Gráfico N°1. Ecuación de continuidad

Considerándose el tramo de un tubo de corriente, como se indica en el gráfico N° 1 con secciones A1 y A2 y velocidades V1 y V2 respectivas, la cantidad de líquido de peso específico que pasa por una sección, en una unidad de tiempo y si el líquido se considera incomprensible será de un modo general la siguiente ecuación:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Donde surge que el caudal está expresado de la siguiente fórmula:

$$Q = A.v$$

Donde: Q = Caudal (m³/s)

V = Velocidad media de la sección (m/s)

A = Área de la sección de la tubería (m²)

2.6 Presión

Es la fuerza por unidad de área a que está sometida una partícula de un fluido. La presión en una partícula de un fluido es igual en todas las direcciones. La diferencia de presión entre dos puntos de un conducto (tubería, canal) es la causa del movimiento (caudal) de un fluido.

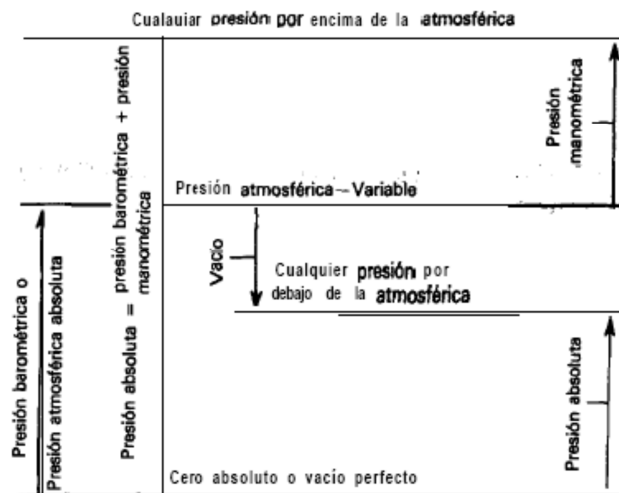


Gráfico N°2. Relación entre las presiones

Presión atmosférica: Es la debida al peso del aire en un sitio particular de la superficie terrestre, por lo que su valor depende de la ubicación, altitud y latitud del lugar.

Presión absoluta: Es la presión que se mide con relación al cero absoluto de presión, donde no existe presencia de aire, o en su defecto es igual a la suma de la presión manométrica más la atmosférica.

Presión barométrica: Es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro, a nivel del mar. Esta presión es próxima a 14,7 PSI

Presión manométrica: Es la determinada por cualquier instrumento que mide la diferencia entre cualquier presión absoluta por encima de la atmosférica y la presión atmosférica del lugar donde se efectúa la medición.

Vacío: El vacío es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta.

Las unidades más usadas de presión son: en el sistema Inglés $\text{PSI} = \frac{\text{libras}}{\text{pulg}^2}$ y en el Sistema Internacional $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$.

2.7 Ecuación general de energía.

En hidráulica, la energía total de un fluido incompresible en movimiento puede representarse por la suma de las energías cinética, potencial y de posición, y se puede expresar de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$E_{\text{Total}} = E_{\text{Cinética}} + E_{\text{Potencial}} + E_{\text{Posición}}$$

Energía Cinética: La energía cinética de la masa del fluido es la medida de la capacidad del fluido de hacer un trabajo en virtud de su velocidad. Su magnitud es comúnmente expresada en unidades de energía por unidad de peso.

$$E_c = \frac{v^2}{2g}$$

Sus dimensiones son de longitud y representa la altura de una columna de fluido comúnmente conocida como altura de velocidad.

Donde: v = Velocidad media (m/s).

g = Aceleración de la gravedad del lugar (m/s^2).

Energía Potencial: La energía de presión es la medida del trabajo realizado por la fuerza debido a la presión en la masa del fluido. Su magnitud es comúnmente expresada en unidades de energía por unidad de peso.

$$E_p = \frac{P}{\gamma}$$

Esta cantidad tiene también dimensiones de longitud y se la conoce como altura de presión.

Donde: P = Presión en una sección cualquiera de la tubería (m)

γ = Peso específico del fluido (N/m^3)

Energía de Posición o Elevación: La energía de elevación contenida en la masa de un fluido en movimiento se mide respecto de un plano o altura de referencia. Es la energía requerida para elevar el fluido a esa posición. Y expresada en unidades de energía por unidad de peso tenemos.

$$E_p = z$$

La suma algebraica de la altura cinética, altura potencial y la altura de posición, son muy aproximadamente la energía contenida por unidad de peso del fluido a través de una tubería.

$$E_{\text{TOTAL}} = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z$$

Esta ecuación la energía total esta expresada en (m.c.a)

2.7.1 Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli es una forma de expresión de la Ley de Conservación de la Energía para el flujo de fluidos en un conducto. Esta ecuación es un balance energético entre dos secciones de flujo en un conducto.

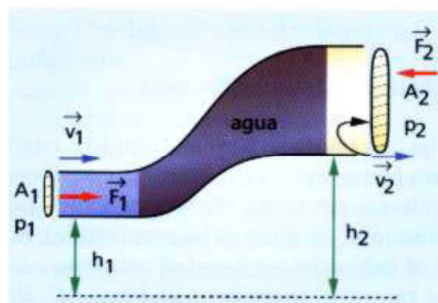


Gráfico N°3. Balance energético en instalación hidráulica

La ecuación de Bernoulli considera que la energía no se altera es decir se mantiene constante. Esto en un proceso sin pérdidas, significa que entre dos secciones cualquiera de un conducto se cumple:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Sin embargo, hay varias restricciones para utilizar la ecuación de Bernoulli que se indican a continuación:

- ✓ Solo valida para fluidos incompresibles
- ✓ Entre las dos secciones de interés no puede haber dispositivos mecánicos como bombas.
- ✓ No puede haber pérdida de energía por fricción y accesorios en el sistema de flujo.
- ✓ No puede haber transferencia de calor hacia el sistema o fuera de este.

2.7.2 Pérdidas de energía en un sistema a presión de un flujo incompresible.

Del planteamiento de la ecuación de energía para un tubo de corriente de fluido real incompresible que se mueve entre dos puntos de un sistema se obtiene, teniendo en cuenta que se desarrollan pérdidas de energía.

$$E_{T1} = E_{T2} + \sum \text{pérdidas}$$

Donde: E_{T1} = energía total disponible en el punto inicial.

E_{T2} = energía total disponible en el punto final.

$\sum \text{pérdidas}$ = Sumatoria de las pérdidas de energía producidas por fricción y accesorios entre los puntos inicial y final del planteamiento de la ecuación de energía.

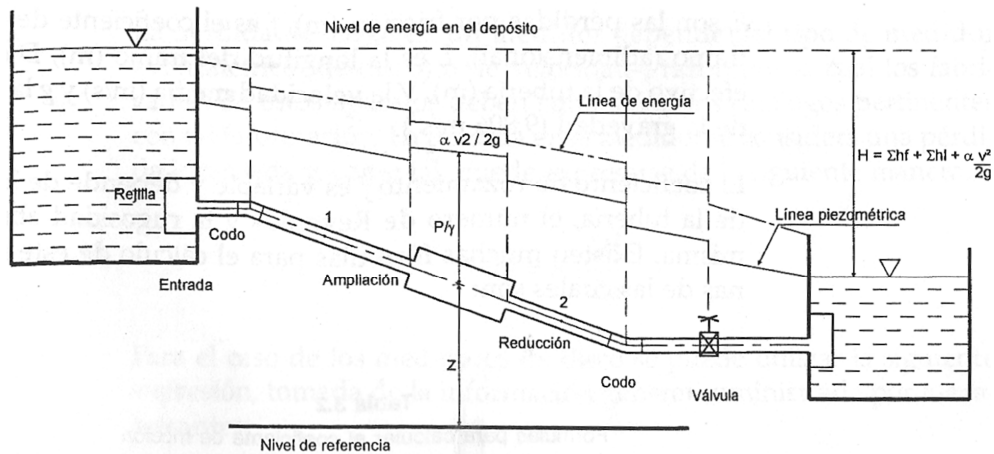


Gráfico N°4. Pérdidas de energía en un sistema a presión.

Tal como se presenta en el gráfico N°4 del planteamiento de la ecuación de energía, se tiene que:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

Donde: z = altura con respecto a un nivel de referencia.

v = velocidad media en la sección transversal.

$\frac{P}{\gamma}$ = presión en el eje del tubo.

α = coeficiente de corrección de la energía cinética, al considerar distribuciones uniformes de velocidad en un flujo turbulento, $\alpha=1$.

$\sum (hf+hm)$ = sumatoria de las pérdidas de energía producidas por fricción y accesorios.

Como resultado del análisis de la expresión anterior, es importante conocer el comportamiento de la variación de la energía a lo largo de un sistema, comportamiento que se realiza a partir de lo que en hidráulica se denomina línea de energía y línea piezométrica.

Cuando se desarrolla flujo a presión, con presión diferente de la atmosférica, de un fluido incomprensible a través de un sistema, la

resistencia al flujo se expresa en función de las pérdidas de energía, la caída de la línea de energía en la dirección del flujo.²

2.8 Regímenes de Flujo de fluidos en tuberías

Para la resolución de problemas prácticos de flujos en tuberías que frecuentemente se presentan en diversas ramas de la ingeniería se aplicaran el principio de la energía. El flujo de un fluido real es más complejo que el fluido ideal. Debido a la viscosidad de los fluidos reales, en su movimiento aparecen fuerzas cortantes entre las partículas fluidas y las paredes del contorno y entre las distintas capas de fluido.

Existen dos tipos de flujos permanentes en el caso de fluidos reales, que se llaman flujo laminar y flujo turbulento.

2.8.1 Flujo Laminar

Es aquel en el cual las partículas del fluido siguen trayectorias paralelas, formando junto de ellas capas o laminas. La velocidad de estas partículas es mayor cuando están más alejadas de las paredes del conducto, o sea que la velocidad de dichas partículas está en función de la distancia a las paredes del conducto.



Gráfico N°5. Flujo laminar

² Tomado de "Diseños Hidráulicos sanitarios y de gas en edificaciones", Rodríguez D. Héctor, Pág. 55

2.8.2 Flujo Turbulento

Es aquel en el cual las partículas del fluido no siguen trayectorias paralelas, es decir se mueven en forma desordenada en todas las direcciones. Es imposible conocer la trayectoria de una partícula individualmente.



Gráfico N°6. Flujo turbulento

Se puede cuantificar numéricamente el tipo de flujo presente en un conducto mediante un coeficiente adimensional llamado "Número de Reynolds (Re)".

2.9 Número de Reynolds

Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad, de la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como el NÚMERO DE REYNOLDS, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.

$$Re = \frac{v * D * \rho}{\mu} = \frac{v * D}{\nu}$$

Donde: Re = Número de Reynolds

v = Velocidad media del flujo (m/s)

D = Diámetro interno de la tubería (m)

ν = Viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

Tabla N° 2. Condiciones de flujo según Reynolds

Tipo de Flujo	Re
Laminar	$Re < 2\,320$
Transición (probablemente turbulento)	$2\,320 \leq Re \leq 10\,000$
Turbulento	$Re > 10\,000$

2.10 Pérdidas de carga por fricción en tuberías.

La pérdida de energía por fricción es la debida al rozamiento del fluido con las paredes de la tubería o del conducto. Esta pérdida, continúa en la dirección del flujo, puede resultar considerable en tramos largos y, por el contrario, ser despreciable en tramos cortos.

2.10.1 Ecuación de Darcy-Weisbach

El modelo matemático desarrollado por los ingenieros Henry Darcy y Julius Weisbach, determinado a finales de la década de los años veinte, esta basado en desarrollos matemáticos de la física clásica y es el modelo que mejor describe, desde el punto de vista racional, la pérdida de energía en una tubería.

Esta ecuación expresa que las pérdidas son directamente proporcional al diámetro de la tubería y a la altura de velocidad, e inversamente proporcional al diámetro de la tubería. La proporcionalidad se establece mediante un coeficiente “*f*” denominado coeficiente de fricción, que es función de la rugosidad de la tubería y de las características del flujo a presión establecido con el número de Reynolds.

La ecuación de Darcy-Weisbach en general se expresa de la siguiente manera:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde: h_f = Pérdidas por fricción (m)

f = Coeficiente de fricción del tramo (adimensional)

L = Longitud del tramo (m)

D_i = Diámetro interno de la tubería (m)

v = Velocidad media del flujo (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (9.806 m/s^2)

2.10.1.1 Coeficiente de fricción (f).

El coeficiente de fricción (f) es variable y depende de la geometría de la tubería, el número de Reynolds y la rugosidad absoluta de la misma. Se puede deducirse matemáticamente en el caso de régimen laminar y en el caso de flujo turbulento no se dispone de relaciones matemáticas sencillas. A continuación se exponen algunas ecuaciones empíricas para la determinación de f .

- a. Para flujo laminar ($0 \leq Re \leq 2320$) en todas las tuberías y para cualquier fluido, Hagen y Poiseuille determino la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{Re}$$

- b. Para flujo en Transición o Turbulento ($Re > 2320$), muchos ingenieros hidráulicos e investigadores plantean ecuaciones empíricas a partir de sus propios resultados como de los resultados obtenidos por otros investigadores, para el cálculo del coeficiente de fricción. A continuación se exponen las más importantes para el cálculo de tuberías.

- ✓ Blasius. Propone una expresión valida para tubos lisos (aluminio, latón, cobre, plomo, plástico, vidrio y asbesto-cemento) para $3000 \leq Re \leq 10^5$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

- ✓ Kozeny. Propone la siguiente expresión válida para tubos de asbesto-cemento para $Re > 4000$

$$f = \frac{2g}{(7.78 \log Re - 5.95)^2}$$

- ✓ Rodríguez Díaz. Propone la siguiente expresión válida para tubos lisos (PVC, Cobre) con $4000 < Re < 10^7$

$$f = 0.2131 Re^{-0.2104}$$

- ✓ Prandtl y Von-Karman. Amplían el rango de validez de la fórmula de Blasius para tubos lisos $3000 \leq Re \leq 3 \cdot 10^6$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f}) - 0.8$$

- ✓ Nikuradse. Propone una ecuación válida para tuberías rugosas para $\frac{1}{30} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq \frac{1}{1014}$.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71}\right)$$

Colebrook-White. Agrupan las dos expresiones anteriores en una sola, que es además válida para todo tipo de flujos y rugosidades. Es la más exacta y universal, pero el problema radica en su complejidad de que se requiere de iteraciones:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}}\right)$$

Diagrama de Moody.- Moody consiguió representar la expresión Colebrook-White en un diagrama universal, que lleva su nombre, para determinar el coeficiente de fricción f en tuberías de rugosidad comercial que transportan cualquier tipo de fluido (Anexo 1).

El diagrama muestra la gráfica del factor de fricción versus el número de Reynolds (Re) con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa (ε/D). Observaciones importantes acerca de estas curvas:

- ✓ Para un flujo con número de Reynolds dado, conforme aumenta la rugosidad relativa ε/D , el factor de fricción aumenta.
- ✓ Para una rugosidad relativa ε/D , el factor de fricción disminuye con el aumento del número de Reynolds, hasta que se alcanza la zona de turbulencia completa.
- ✓ Dentro de la zona de turbulencia completa, el número de Reynolds no tienen ningún efecto sobre el factor de fricción.

En lugar del diagrama de Moody se puede utilizar la siguiente ecuación explícita para determinar f con una tolerancia de $\pm 1\%$ con las siguientes restricciones: $10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2}$ y $5000 \leq Re \leq 10^8$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde: ε/D = Rugosidad relativa (adimensional)

Re = Número de Reynolds

g = Aceleración de la gravedad (9.806 m/s^2)

2.10.1.2 Rugosidad Relativa

Es la relación entre la rugosidad promedio de su pared o rugosidad absoluta (ε) y el diámetro interno (D_i) de la tubería. Debido a que la rugosidad es algo irregular, se tomara valores promedios.

Para su selección se deben considerar los siguientes factores:

- ✓ Material de fabricación de la tubería o conducto
- ✓ Proceso de fabricación de la tubería
- ✓ Naturaleza del líquido a ser conducido

- ✓ Edad del conducto o tubería (tiempo de servicio)

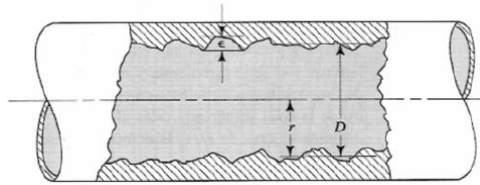


Gráfico N°7. Rugosidad exagerada de la pared de un tubo

Como se aprecia en la tabla N° 3 se ha determinado el valor de la rugosidad absoluta (ϵ) para tubos existentes comercialmente. Estos son valores promedios para tuberías nuevas y limpias. Es de esperarse cierta variación una vez que una tubería ha estado en servicio durante algún tiempo, la rugosidad cambia debido a la corrosión y a la formación de depósitos en la pared.³

Tabla N°3. Rugosidad absoluta (ϵ) en tubos comerciales

Material de conducto	Rugosidad absoluta ϵ (mm)
Vidrio	Liso
Plástico (PVC)	0.005
Tubo extruido; cobre, latón y acero	0.0015
Acero comercial o soldado	0.0460
Hierro Galvanizado	0.1500
Hierro dúctil, recubierto	0.1200
Hierro dúctil, no recubierto	0.2400
Concreto, bien fabricado	0.1200
Acero remachado	1.8000
Asbesto cemento nuevo	0.0250

³ Tomado de "Mecánica de fluidos", Mott Robert, Pág. 235

2.10.2 Ecuación de Hazen-Williams

Como respuesta a la dificultad que existía en la época para la solución del factor de fricción de Darcy, surgen ecuaciones empíricas como la desarrollada de manera independiente por A.H. Hazen y G.S. Williams en 1933. La ecuación resultante es explícita para la velocidad, caudal y de muy fácil utilización, por lo que su empleo se ha popularizado para el análisis y diseño de sistemas hidráulicos.

La formulación de la ecuación de Hazen-Williams es la siguiente:

$$Q = 0,2785 C D^{2,63} J^{0,54}$$

$$h_f = J \cdot L_e$$

Donde: Q = Caudal (m^3/s)

C = Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

D = Diámetro interno de la tubería (m)

h_f = Pérdida de energía (m)

J = Pérdida de carga unitaria o pendiente de la línea de energía (m/m de tubería)

L_e = Longitud equivalente de la tubería.

Aunque su empleo es muy generalizado, se debe tener en cuenta que existen varias restricciones para su utilización y que de no considerarse llevarán a sobredimensionar la tubería. Por lo anterior, se presentan a continuación algunas recomendaciones para su uso:

- ✓ Válida para el transporte de agua a temperaturas normales (15°C).
- ✓ Diámetro superior a 2".
- ✓ Velocidad de flujo menor que 3 m/s.
- ✓ Resultados comparables con Darcy - Weisbach para un número de Reynolds relativamente alto.
- ✓ Apropiaada selección del coeficiente de rugosidad, C .

2.10.2.1 Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, C

Este coeficiente es función principalmente del material de la tubería y del estado de las paredes del tubo. Con el tiempo se presentarán incrustaciones de calcio y magnesio (elementos contenidos en el agua) en las paredes de la tubería, modificando así la rugosidad; este fenómeno es especialmente crítico para tuberías de acero o hierro fundido (Gráfico N° 8 caso b). Los tubos de concreto, asbesto- cemento, cobre y plástico mantienen sus características originales de rugosidad por un mayor período de tiempo. Otro factor de modificación de la rugosidad es la corrosión de la tubería, la cual se manifiesta por medio de "tubérculos" que aparecen en la superficie interna (Gráfico N° 8 caso c). Este fenómeno es más controlable que el de la incrustación, ya que es posible revestir adecuadamente la superficie interna de la tubería.

Como se puede observar, estos materiales son muy susceptibles de alteración, por lo que se recomienda diseñar la tubería con un valor de C de la tubería en uso, aun cuando el valor de C original es de interés para conocer el caudal inicial.

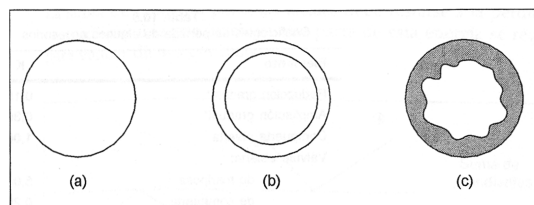


Gráfico N° 8. Modificación del coeficiente de rugosidad

En la tabla N° 4 se indican algunos valores comunes de C para diferentes materiales; allí también se observa la reducción gradual del coeficiente de rugosidad con el tiempo.⁴

Tabla N° 4. Coeficientes de C para la fórmula de Hazen - Williams

⁴ Tomado de "Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados", López Ricardo, Pág. 220

Tipo de Conducto	C
Acero corrugado	60
Acero galvanizado	125
Asbesto-cemento	140
Cobre	130
PVC	140
Hormigón liso	130
Hormigón ordinario	120
Hierro fundido nuevo	130
Hierro fundido viejo	90

2.11 Pérdidas de carga por accesorios.

Es la pérdida de energía, producida en una pequeña región cercana al sitio donde se presenta cambio en la geometría del conducto o cambio en la dirección del flujo (codos, bifurcaciones, válvulas, etc.), que se traduce en una alteración de las condiciones de flujo.

A este tipo de pérdidas también se les llaman pérdidas menores, este es un nombre incorrecto porque en muchas situaciones son las más importantes que las pérdidas por fricción. Este tipo de pérdidas se pueden calcular a través de dos métodos.

- ✓ Primer método: Ecuación fundamental de las pérdidas de carga secundarias
- ✓ Segundo método: Longitud de tubería equivalente

2.11.1 Ecuación fundamental de las pérdidas de carga por accesorios.

Las pérdidas de energía son proporcionales a la carga de velocidad del fluido, conforme pasa por un codo, expansión o contracción de la sección del flujo, o por una válvula. Por lo general se expresan como un coeficiente de resistencia K multiplicado por la altura de velocidad.

$$h_m = K \frac{v^2}{2g}$$

El método exacto para determinar el coeficiente de resistencia K para válvulas o acoplamientos es mediante la siguiente ecuación.

$$K = \left(\frac{L_e}{D_i} \right) f_T$$

Donde: L_e = Longitud equivalente (longitud de una tubería recta del mismo diámetro nominal que del accesorio).

D = Diámetro interior real de la tubería.

f_T = factor de fricción en la tubería a la que esta conectada el accesorio (que se da por hecho esta en la zona de turbulencia completa).

En la tabla N°5 se presentan valores (L_e/D_i), llamado relación de longitud equivalente.⁵

Tabla N°5. Resistencia de longitud equivalente en número de diámetros de tubería (L_e/D_i).

Accesorios	(L_e/D_i)
Codo estándar de 90°	30
Codo estándar de 45°	16
Codo curvo 90°	20
Codo en U	50
Te estándar: Con flujo Directo	20
Con flujo en el ramal	60
Con flujo bilateral	65
Unión o Universal	6
Válvula angular abierta	150
Válvula de bola o esférica abierto totalmente	150
Válvula de compuerta: Abierto totalmente	8

⁵ Tomado de "Mecánica de fluidos", Mott Robert, Pág. 297

$\frac{3}{4}$ abierto	35
$\frac{1}{2}$ abierto	160
$\frac{1}{4}$ abierto	900
Válvula de Globo abierta totalmente	340
Válvula de retención (check) : Convencional	50
En Y	100
Válvula de pie con colador: Disco de vástago	420
Disco de bisagra	75

Los valores de f_T varía según el tamaño de la tubería, lo que hace que el valor del coeficiente de resistencia K también varíe. En la tabla N° 6 presenta una lista de los valores de f_T para tamaños estándar de tubería de acero comercial, nueva y limpia.

Tabla N°6. Factor de fricción (f_T) en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial.

Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_T	Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_T
1/2	0.027	3 1/2 - 4	0.017
3/4	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
1 1/4	0.022	8 - 10	0.014
2 1/2	0.021	12 - 16	0.013
2	0.019	18 - 24	0.012
2 1/2 - 3	0.018		

El procedimiento para calcular la pérdida de energía que causan los diferentes accesorios de un sistema hidráulico es la siguiente:

1. En la tabla N°5 encontrar L_e/D para la válvula o accesorio
- 2a. Si la tubería es de acero nueva y limpia:
 - ✓ En la tabla 6 encontrar f_T .
- 2b. Para tubo de otros materiales:
 - ✓ Con la tabla N°3, determinar la rugosidad e del tubo
 - ✓ Calcular ϵ/D_i .

- ✓ Emplear el diagrama de Moody (anexo 1), para determinar f_T en la zona de turbulencia completa.
- 3. Calcular $K = f_T (L_e/D)$.
- 4. Calcular $h_m = K (v^2/2g)$, donde v es la velocidad en el tubo.

2.11.2 Pérdidas de carga en piezas especiales.

En casi todos los casos las pérdidas menores se determinan experimentalmente, pero hay una importante excepción para los siguientes accesorios.

2.11.2.1 Ampliación Brusca

Conforme un fluido pasa de una tubería pequeña a otra más grande a través de una ampliación brusca, su velocidad disminuye de manera abrupta, lo que ocasiona turbulencia que genera una pérdida de energía como se muestra en el siguiente gráfico.

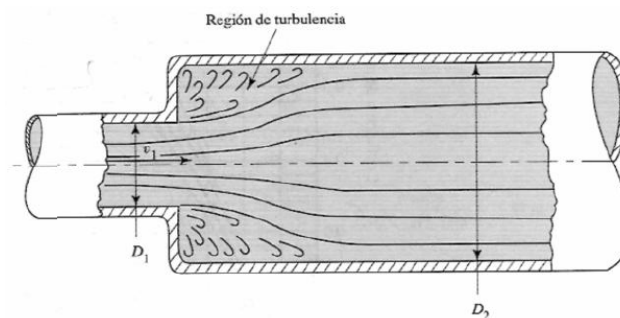


Gráfico N°9. Esquema de una ampliación Brusca

La cantidad de turbulencia, y por consiguiente, la cantidad de pérdida de energía, depende del cociente entre los diámetros de los conductos (D_2 / D_1). La pérdida menor se calcula con la ecuación:

$$h_m = K \frac{v_1^2}{2g}$$

Al hacer algunas suposiciones simplificadoras sobre el carácter de la corriente de flujo, es posible predecir de manera analítica el valor de K, con la siguiente ecuación.⁶

$$K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$$

Donde: D_1 = Diámetro de la sección más pequeña de tubería

D_2 = Diámetro de la sección más grande de tubería

v_1 = Velocidad promedio del flujo en la tubería de menor diámetro

2.11.2.2 Contracción Brusca

El mecanismo mediante el cual se pierde energía debido a una contracción brusca es bastante complejo. Conforme las líneas de corriente se acercan a la contracción; adoptan una trayectoria curva y durante cierta distancia la corriente en su conjunto sigue después del angostamiento.

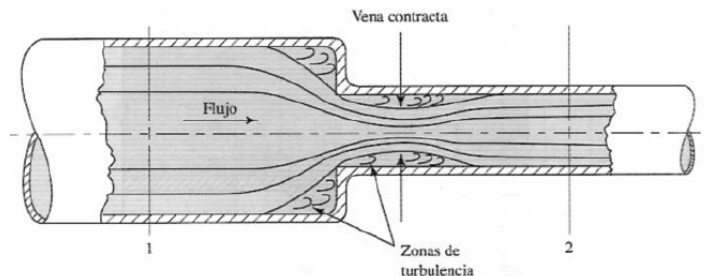


Gráfico N° 10. Esquema de una contracción Brusca

Así, la sección transversal mínima efectiva del flujo es más pequeña que la de la tubería menor. La sección en que ocurre esta área mínima de flujo se denomina vena contracta, lo cual ocasiona que la corriente desacelere y expanda de nuevo para llenar la tubería.

⁶ Tomado de "Mecánica de fluidos", Mott Robert, Pág. 281

El coeficiente de resistencia K depende de la relación de los tamaños de las dos tuberías y de la velocidad de flujo. La pérdida menor se calcula a partir de la ecuación:⁷

$$h_m = K \frac{v_2^2}{2g}$$

Donde: D_1 = Diámetro de la sección más grande de tubería

D_2 = Diámetro de la sección más pequeña de tubería

v_2 = Velocidad promedio del flujo en la tubería de menor diámetro

K = Se encuentra en la tabla N°7

Tabla N°7. Coeficiente de resistencia - contracción brusca.

D_1/D_2	K
1.2	0.08
1.4	0.17
1.6	0.26
1.8	0.34
2.0	0.37
2.5	0.41
3.0	0.43
4.0	0.45
5.0	0.46

2.11.2.3 Expansión gradual

Depende de la brusquedad con que se efectúa la contracción.

⁷ Tomado de "Mecánica de fluidos", Mott Robert, Pág. 281

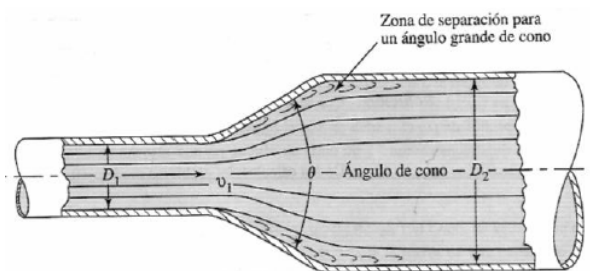


Gráfico N°11. Esquema de una expansión Gradual.

El coeficiente de pérdidas K esta supeditado al ángulo Θ y se calcula mediante la siguiente ecuación:⁸

$$h_m = K \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

Donde: v_1 = Velocidad promedio del flujo en la tubería de menor diámetro

v_2 = Velocidad promedio del flujo en la tubería de mayor diámetro

K = Se encuentra en la tabla N°8.

Tabla N°8. Coeficiente de resistencia - expansión gradual.

D1/D2	Θ°						
	4°	10°	15°	20°	30°	50°	60°
1.20	0.02	0.04	0.09	0.16	0.25	0.35	0.37
1.40	0.03	0.06	0.12	0.23	0.36	0.5	0.53
1.60	0.03	0.07	0.14	0.26	0.42	0.57	0.61
1.80	0.04	0.07	0.15	0.28	0.44	0.61	0.65
2.00	0.04	0.07	0.16	0.29	0.46	0.63	0.68
2.50	0.04	0.08	0.16	0.3	0.48	0.65	0.7
3.00	0.04	0.08	0.16	0.31	0.48	0.66	0.71
4.00	0.04	0.08	0.16	0.31	0.49	0.67	0.72
5.00	0.04	0.08	0.16	0.31	0.5	0.67	0.72

⁸ Tomado de "Mecánica de fluidos", Mott Robert, Pág. 285

2.11.2.4 Contracción gradual

La pérdida de energía en una contracción puede disminuir en forma sustancial si la contracción se hace más gradual.

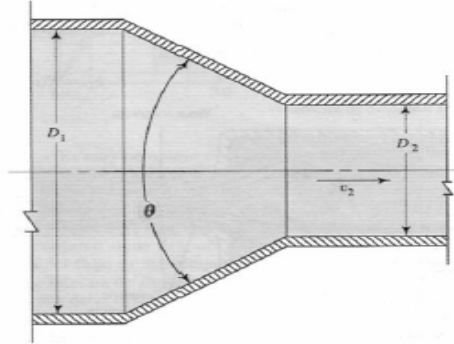


Gráfico N° 12. Esquema de una expansión Gradual.

Con el Abaco ilustra a continuación se puede obtener los valores de coeficiente resistencia K para distintos valores del ángulo del cono ($\theta \geq 15^\circ$).

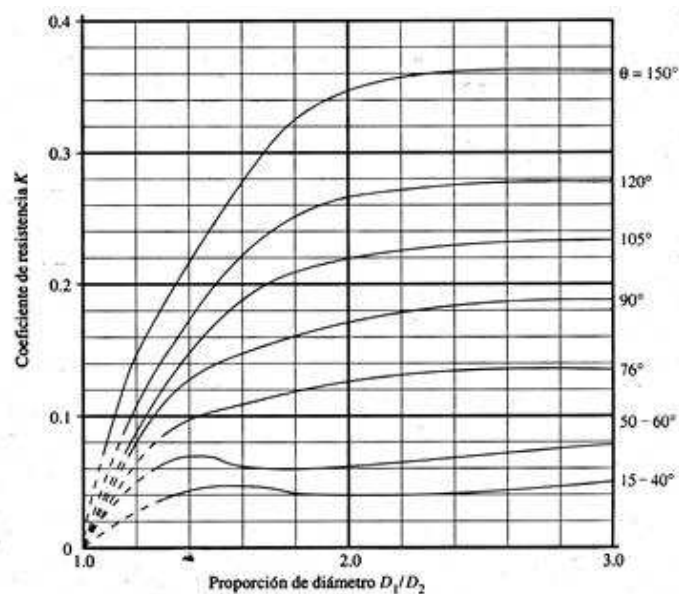


Gráfico N° 13. Coeficiente de resistencia - contracción gradual con $\theta \geq 15^\circ$.

La pérdida de energía se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_m = K \frac{v_2^2}{2g}$$

Donde: v_2 = Velocidad promedio del flujo en la tubería de menor diámetro

2.11.2.5 Pérdida por entrada

Sucede cuando un fluido se mueve de un depósito o tanque relativamente grande hacia una tubería. El fluido debe acelerar desde una velocidad despreciable a la velocidad de flujo en la tubería. La facilidad con que la aceleración se lleva a cabo determina la cantidad de pérdida de energía y, por lo tanto, el valor del coeficiente de resistencia de la entrada depende de la geometría de ésta.

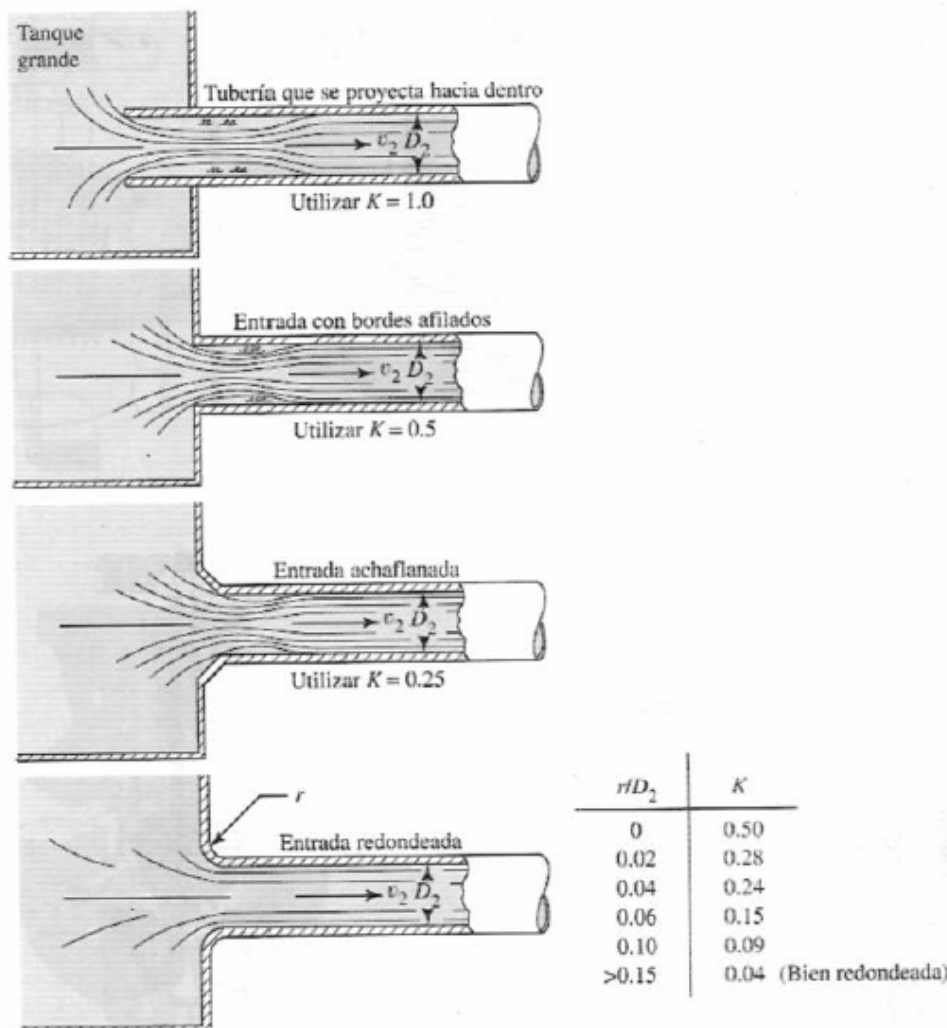


Gráfico N° 14. Coeficiente de pérdidas de carga por entrada.

2.11.2.6 Pérdida en la salida de tubería

Conforme el fluido pasa de una tubería a un depósito o tanque grande (Gráfico N° 15), su velocidad disminuye hasta casi cero. En el proceso se disipa la energía cinética que el fluido tenía en la tubería. Por lo tanto, el

valor del coeficiente de pérdidas $K = 1.0$ sin importar la forma de la salida y el lugar donde se conecta a la pared del tanque.

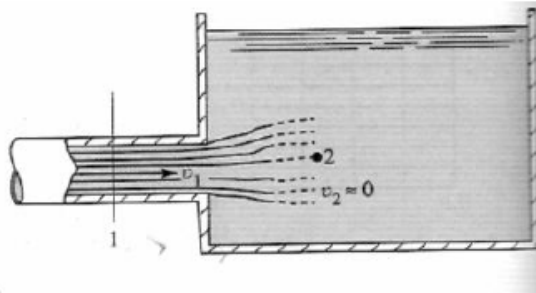


Gráfico N°15. Esquema una salida de tubería.

2.12 Longitud de tubería equivalente.

Este segundo método consiste en catalogar las pérdidas por accesorios en la forma de la longitud equivalente (L_e), es decir la longitud en metros de un trozo de tubería del mismo diámetro que produciría la misma pérdida de carga que el accesorio en cuestión.

Así cada codo, medidor de caudal, válvula, etc., se sustituirá por una longitud de tubería equivalente (L_e) que luego se aplicara sea la ecuación de Darcy-Weisbach o Hazen-Williams. A continuación se expondrá la pérdida de carga para la primera ecuación descrita anteriormente.

$$\Delta H = \sum (h_f + h_m) = f \left(\frac{L_{\text{Tubería}} + L_e}{D_i} \right) \frac{v^2}{2g}$$

En la tabla N°5 se presenta la longitud equivalent e expresada en número de diámetros para accesorios y válvulas más comunes dentro de la hidráulica.

2.13 Tipos de Válvulas

2.13.1 Válvulas de Compuerta

La válvula de compuerta es una válvula que abre mediante el levantamiento de una compuerta o cuchilla (la cuál puede ser redonda o rectangular) permitiendo así el paso del fluido.

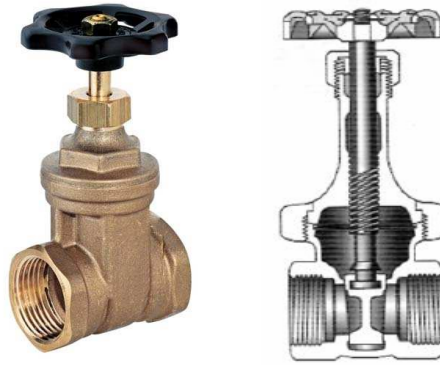


Gráfico N° 16. Esquema una salida de tubería

Ventajas

- ✓ Alta capacidad.
- ✓ Cierre hermético.
- ✓ Bajo costo.
- ✓ Diseño y funcionamiento sencillos.
- ✓ Poca resistencia a la circulación.

Desventajas

- ✓ Control deficiente de la circulación.
- ✓ Se requiere mucha fuerza para accionarla.
- ✓ Produce cavitación con baja caída de presión.
- ✓ Debe estar cubierta o cerrada por completo.
- ✓ La posición para estrangulación producirá erosión del asiento y del disco

2.13.2 Válvulas de Globo

Una válvula de globo es de vueltas múltiples, en la cual el cierre se logra por medio del disco o tapón que cierra o corta el paso del fluido en un asiento que suele estar paralelo con la circulación en la tubería.

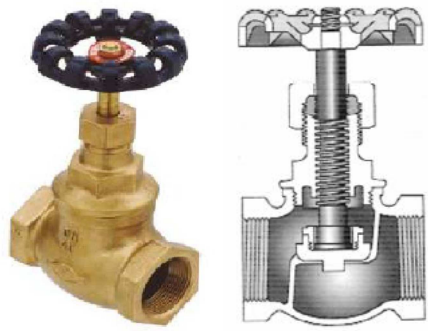


Gráfico N°17. Válvula de globo.

La válvula realiza un control preciso de la circulación aunque presenta cierta resistencia a la misma. Se la recomienda para regular la circulación de un fluido por estrangulación y en accionamientos frecuentes.⁹

2.13.3 Válvulas de Bola o esférica

Las válvulas de bola son de 1/4 de vuelta, pues la bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola 90° y cierra el conducto.



Gráfico N°18. Válvula de bola.

Se recomienda en aplicaciones que requieran apertura rápida con resistencia mínima a la circulación, a temperaturas moderadas.

⁹ Tomado de “Mecánica de fluidos”, Mott Robert, Pág. 294

2.13.4 Válvulas de Retención (Check)

La válvula de retención se emplea para evitar el retorno del agua por una tubería, es decir, el flujo es en un solo sentido. Existen varios tipos de válvulas de retención a continuación se exponen los de tipo giratorio.

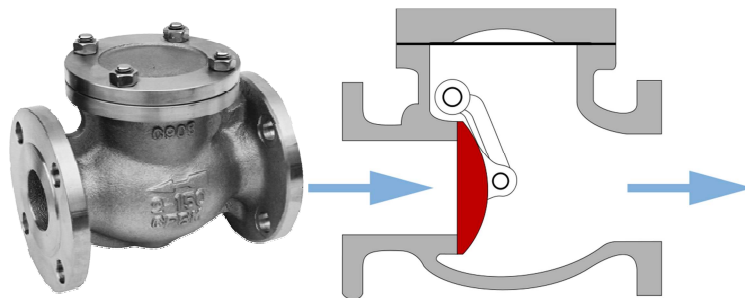


Gráfico N°19. Válvula de retención (check) convencional.

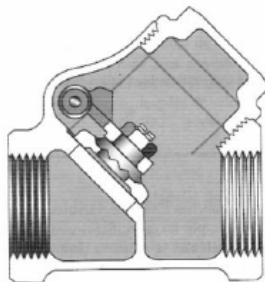


Gráfico N°20. Válvula de retención (check) en Y.

Estas válvulas son ampliamente utilizadas en tuberías conectadas a sistemas de bombeo para evitar golpes de ariete, principalmente en la línea de descarga de la bomba.

2.13.5 Válvula de pie con alcachofa o colador

Las válvulas de pie llevan a cabo una función similar a las válvulas check se emplean en la entrada de las líneas de succión que conducen fluido de un tanque de abastecimiento de una bomba. Es común que estén equipados con un filtro integral para mantener los objetos extraños fuera del sistema de tuberías. A continuación se exponen dos tipos de válvulas de pie tipo disco.

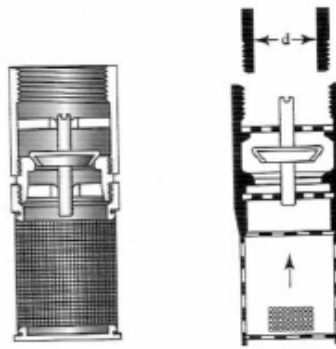


Gráfico N°21. Válvula de pie con colador, tipo disco de vástago.

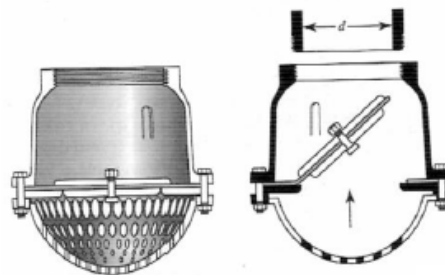


Gráfico N°22. Válvula de pie con colador, tipo disco de bisagra.

2.14 Bombas y sistemas de bombeo

2.14.1 Bombas

Una bomba es una máquina hidráulica capaz de convertir la energía mecánica en energía hidráulica.

Las bombas son máquinas usadas para mover fluidos a través de tuberías mediante diferentes transformaciones de energía. La rotación del impulsor en el interior de la bomba crea un vacío dando lugar a una fuerza de succión que favorece la entrada del fluido en la bomba; dentro de la bomba se incrementa la velocidad del fluido. El fluido que trae velocidad y por tanto energía en forma de energía cinética es expandido en el difusor o en la voluta de la bomba transformando la energía cinética en energía de presión al reducirse la velocidad del líquido. Como motores impulsores se utilizan: motores eléctricos, motores de combustión interna, turbinas de vapor, etc.

Externamente las bombas se componen de:

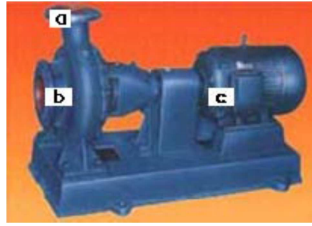


Gráfico N° 23. Parte de las Bombas

Donde: a. Entrada (**intake**)

b. Salida (**descarga**)

c. Medio que le suministre potencia para funcionar (**motor eléctrico**)

2.14.2 Clasificación de bombas

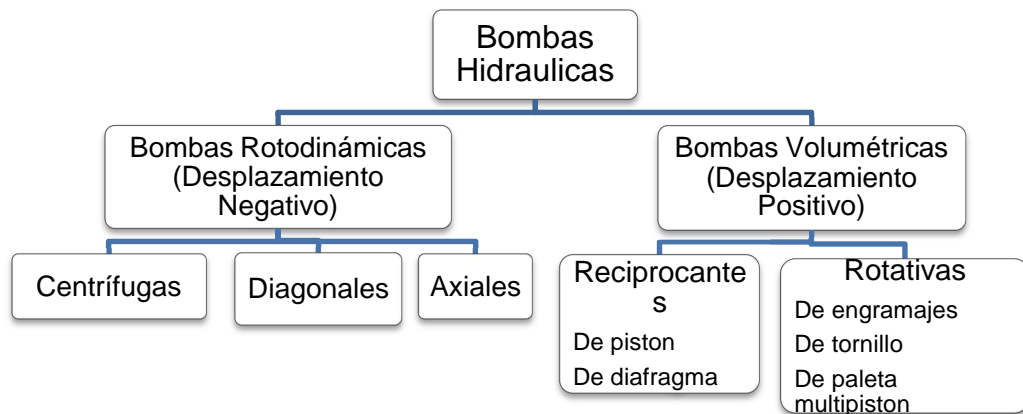
Debido a la diversidad de bomba, hay muchas formas de clasificar las bombas. Por rangos de volúmenes a manejar, por fluidos a mover, etc. Sin embargo, la clasificación más general es en función de la forma en que las bombas imprimen el movimiento al fluido, separándose en dos tipos principales.

- ✓ Bombas rotodinámicas (desplazamiento negativo)
- ✓ Bombas volumétricas (de desplazamiento positivo).

En las bombas rotodinámicas la energía es continuamente suministrada al fluido incrementando su velocidad, luego esa velocidad es reducida en la voluta o difusor de la bomba, produciendo un incremento de presión.

En las bombas volumétricas la energía es periódicamente suministrada al fluido por la aplicación de fuerza directa sobre un volumen de líquido el cual incrementa su presión al valor requerido para moverse en la tubería de descarga.

Tabla No. 7. Clasificación de las Bombas Hidráulicas

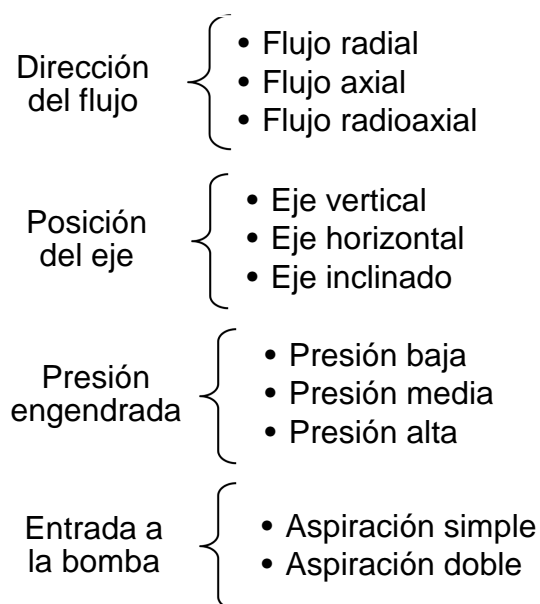


Dentro de ésta clasificación los tipos de bombas más comúnmente utilizadas son las llamadas Centrífugas y en ellas concentraremos éste estudio.

2.14.3 Bombas Centrífugas.

Están constituidos por una caja dentro del cual gira un rodete con paletas que le imponen gran velocidad al líquido transformando la altura de velocidad en presión.

Algunas de las clasificaciones de las bombas centrífugas son:



2.14.4 Elementos constitutivos de las bombas centrífugas

En el gráfico N°24 se indican los elementos de estas bombas.

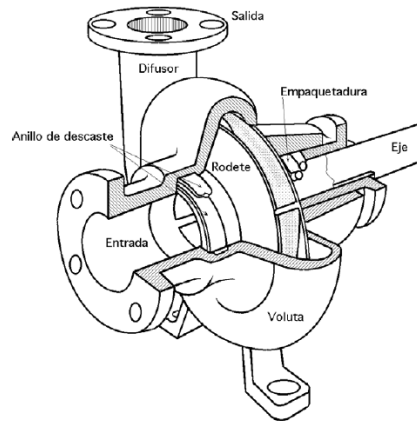


Gráfico N° 24. Elementos constitutivos de una bomba centrífuga.

Rodete. Este elemento está conectado con el motor de la bomba y gira con respecto al eje del mismo. Consta de varios álabes que orientan el fluido dentro del rotor e imparten la energía cinética al fluido. Existen varias formas de rodetes:

- ✓ Rodete cerrado: las caras posterior y anterior conforman una caja y entre ambas caras se fijan los álabes.
- ✓ Rodete semiabierto: los álabes están fijados a una sola cara.
- ✓ Rodete abierto: sin cara posterior o anterior, los álabes están sujetos al núcleo o parte central.

Voluta. Denominada también la "carcasa", forma parte del sistema difusor y conduce el agua a la tubería de impulsión. En ella se realiza otra etapa de la conversión de energía cinética en energía de presión.

Difusor. Este elemento hace el empate entre la bomba y la tubería de impulsión. Puede ser recto o de forma tronco-cónica; en este último caso, realiza otra etapa de conversión de energía.

2.15 Potencia que requieren las bombas

Para hacer una correcta selección de la potencia de la bomba por lo general se debe considerar los siguientes términos.

2.15.1 Altura efectiva de bombeo

Es la altura total contra la cual debe trabajar la bomba. Para obtener la altura dinámica total ((Total Dinamic Head), es necesario establecer la ecuación de energía entre dos puntos utilizamos:

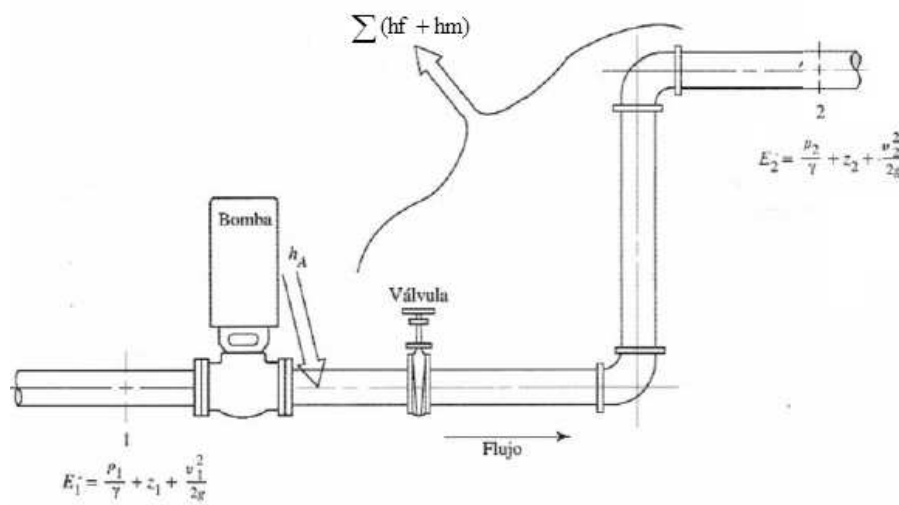


Gráfico N°25 . Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de energía

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_A = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

De la ecuación anterior despejando la altura total sobre la bomba (h_A) se tiene la siguiente expresión.

$$h_A = (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

Algunos diseñadores a este valor de (h_A), suelen llamar como altura dinámica total (TDH), con la siguiente nomenclatura.

$$TDH = H_o + P + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

Donde: TDH = Carga total sobre la bomba o altura dinámica total de bombeo.

$(z_2 - z_1) = H_o =$ Altura estática.

$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} = P =$ Altura de presión en la entrega de líquido.

$\frac{v^2}{2g} =$ Altura de velocidad.

$\Sigma(h_f + h_m) =$ Sumatoria de las pérdidas por fricción de tubería y por accesorios.

Para una correcta aplicación de esta ecuación es necesario interpretar como una expresión del conjunto total de tareas que tiene que realizar la bomba en un sistema dado.

2.15.1.1 Altura estática (H_o)

Es la diferencia de nivel entre el suministro (z_1) y la entrega del líquido z_2 , es decir, la suma de las alturas estáticas de succión e impulsión. Se determina físicamente sobre el sistema, y generalmente se dan las dos configuraciones siguientes:

- ✓ La bomba se encuentra por encima del nivel de succión.

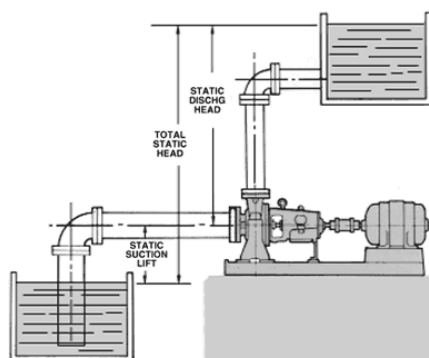


Gráfico N° 26. Bomba por encima de la succión.

- ✓ La bomba se encuentra por debajo del nivel de succión.

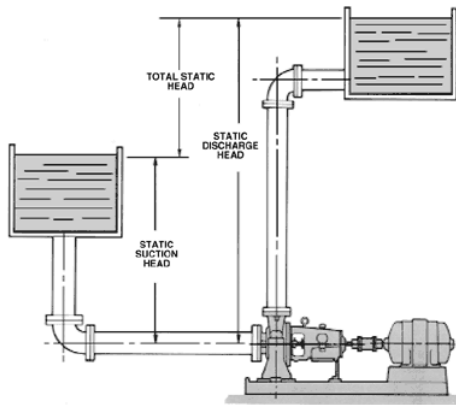


Gráfico N° 27. Bomba por debajo de la succión.

2.15.1.2 Altura de presión (P)

Presión adicional requerida en el nivel de entrega del líquido. En general es la presión de fluido que debe elevar, desde la que tiene en la fuente P_1 , hasta la que tendrá en el punto de destino P_2

2.15.1.3 Altura de velocidad $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$

Representa la energía cinética del fluido ya que se entrega el agua con velocidad.

2.15.1.4 Pérdidas por fricción de tubería y por accesorios $\sum(h_f+h_m)$

Es la altura adicional que debe suministrarse para vencer las pérdidas por fricción en las tuberías de impulsión y de succión. Pueden calcularse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach o Hazen- Williams.

2.16 Potencia que requieren las bombas

Es la potencia precisada por la bomba para realizar una determinada cantidad de trabajo. En mecánica de fluidos se considera que la potencia es la rapidez con que se transfiere la energía.

Para la determinación de la potencia transmitida por la bomba al fluido, se aplicará la siguiente ecuación.

$$P_b = \frac{Q * TDH * \gamma}{750 * \eta}$$

Donde: P_b = Potencia a la entrada de la bomba (HP)

Q = Capacidad o caudal de la bomba (lt/s). Es el volumen por unidad de tiempo, efectivo o real que atraviesa por el conducto de descarga de una bomba.

TDH = Altura dinámica total de bombeo (m).

γ = Peso específico del fluido (kN/m^3).

750 = Coeficiente para transformación de unidades.

η = Eficiencia del conjunto motor bomba.

Una bomba no es 100% eficiente, debido a las pérdidas de energía, las cuales pueden ser clasificadas como:

- ✓ Pérdidas mecánicas: Debidas al rozamiento entre elementos mecánicos.
- ✓ Pérdidas por recirculación: Debidas a corrientes secundarias, falta de hermeticidad, regreso de fluido, etc.
- ✓ Pérdidas hidráulicas: Debidas al impacto a la entrada y salida del impulsor, estrangulamientos, cambios de dirección, fricción del fluido con la carcasa, etc.

Por lo tanto eficiencia del conjunto motor bomba es un coeficiente adimensional, que se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \eta_m * \eta_r * \eta_h$$

Donde: η_m = eficiencia mecánica.

η_r = eficiencia por recirculación.

η_h = eficiencia hidráulica.

2.16.1 Cavitación

El fenómeno de cavitación se presenta cuando la presión en la succión está cercana a la presión de vapor del fluido. En este caso se crean burbujas de aire que, al entrar en zonas de mayor presión, se rompen de manera abrupta. Este continuo rompimiento de las burbujas es causa de daños en el eje del rotor, por lo que se debe evitar dicho fenómeno.

Existe un parámetro de control de la cavitación llamado Altura Neta Positiva de Succión Requerida ($NPSH_r$) y Disponible ($CNPS_d$).

$NPSH_r$. Es una característica de la bomba, por tanto, lo suministra el fabricante. Es aquella energía necesaria para llenar la parte de succión y vencer las pérdidas por rozamiento y por el aumento de velocidad, desde la conexión de aspiración de la bomba, hasta el punto en que se añade más energía.

$CNPS_d$. Es función del sistema de bombeo y se define como la energía que tiene el líquido en la toma de succión de la bomba, independientemente del tipo, esta por encima de la energía del líquido y debido a su presión de vapor se representa por:

$$NPSH_D = \pm z + \frac{P_a - P_v}{\gamma} * 10 - \sum(h_f + h_m)$$

Donde: $\pm z$ = Diferencia de elevación desde el nivel del fluido en el deposito al eje de la tubería de la entrada de succión de la bomba (m). Si la bomba esta abajo del deposito, z es positiva y viceversa.

P_a = Presión atmosférica de la localidad (Kg/cm^2).

P_v = Presión de vapor del líquido a la temperatura a que se bombea (Kg/cm^2).

$\sum(h_f + h_m)$ = Pérdidas de carga por fricción y accesorios en la tubería de succión (m).

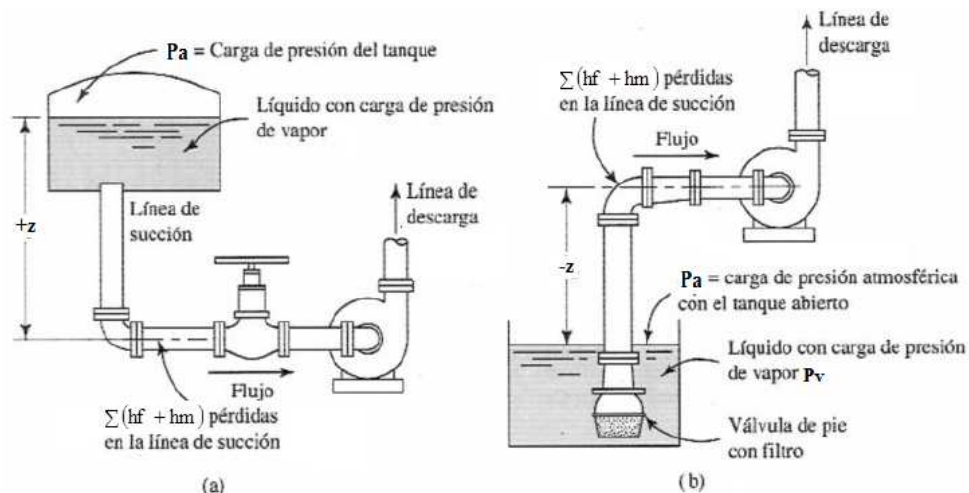


Gráfico N° 28. Detalle de la línea de succión de la bomba y definición de términos NPSH

En las tablas del anexo 3 y 4 se dan valores de la presión atmosférica y de la presión de vapor.

El valor del $NPSH_D$ debe ser superior al valor del $NPSH_R$ para evitar disminuciones del caudal y problemas de cavitación.

2.16.2 Velocidad específica

Es un valor empleado para clasificar los rodets de acuerdo a sus características.

La velocidad específica es independiente del caudal, altura de elevación o tamaño de la bomba, siempre y cuando sean geoméricamente semejantes.

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Donde: N_s = Velocidad específica

N = Velocidad rotacional del rodete (r.p.m)

Q = Caudal a través de la bomba (m^3/s)

H = Altura dinámica de impulsión (m)

Tabla N°9. Clasificación de las bombas centrífugas según la velocidad específica.

n_s	Característica del rodete
40 - 80	Rodete completamente radial (lento)
80 - 140	
140 - 300	
300 - 600	Rodete radioaxial o de flujo mixto
600 - 1.800	Rodete completamente axial (rápido)

2.16.3 Leyes de afinidad

Cuando la velocidad varía:

- ✓ La capacidad varía en forma directa con la velocidad:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- ✓ La capacidad de carga total varía con el cuadrado de la velocidad:

$$\frac{ha_1}{ha_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

- ✓ La potencia que requiere la bomba varía con el cubo de la velocidad:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3$$

Cuando el diámetro del impulsor varía:

- ✓ La capacidad varía en forma directa con el diámetro del impulsor:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

- ✓ La carga total varía con el cuadrado del diámetro del impulsor:

$$\frac{ha_1}{ha_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

- ✓ La potencia que requiere la bomba varía con el cubo del diámetro del impulsor:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3$$

2.17 Curvas características de una bomba

La curva característica de una bomba (Gráfico N° 29) muestra la relación entre el caudal de descarga y la energía que la bomba adiciona al fluido o altura dinámica. Como es de esperarse, a mayor caudal de la bomba menor es la energía que se adiciona.

La curva característica se da para una determinada velocidad del motor y diámetro del rotor. Para otras velocidades y diámetros, puede establecerse a partir de las leyes de afinidad.

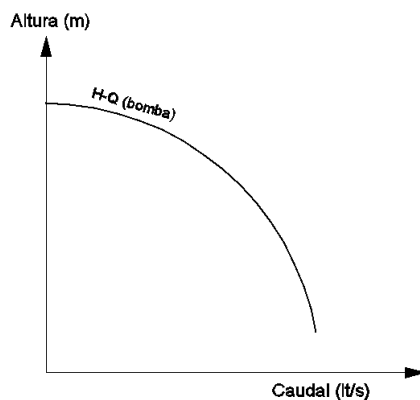


Gráfico N° 29. Curva característica de una bomba

Las curvas características pueden ser planas o inclinadas. Una curva plana implica que, al variar la altura dinámica, la variación en caudal es grande en comparación con el caso de una curva inclinada en donde la variación en caudal es menor.

Las bombas operadas en serie producen el mismo caudal, incrementando la altura dinámica del sistema. Las bombas operadas en paralelo producen la misma altura dinámica, incrementando el caudal del sistema.

2.17.1 Curva de operación del sistema

Representa la cantidad de energía que hay que suministrar para salvar la altura estática y las pérdidas de energía en la estación de bombeo con

diferentes caudales. En la medida en que el caudal es mayor, las pérdidas por fricción y accesorios son mayores.

Se la obtiene calculando las pérdidas de carga tanto para tuberías de succión como para tuberías de descarga y sus respectivos accesorios variando los caudales de diseño.

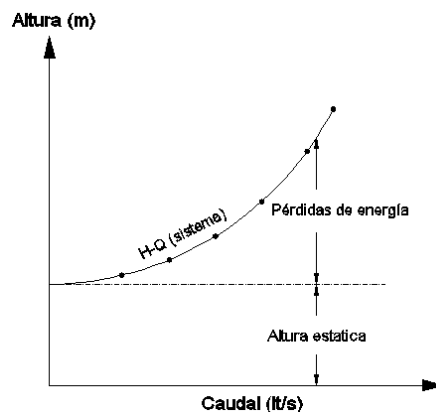


Gráfico N° 30. Curvas características de operación del sistema.

2.17.2 Punto de operación

Cuando la curva característica de la bomba y la curva operación del sistema se sobreponen en una sola gráfica (Gráfico N° 31), se encuentra el rango de operación de la bomba, el cual indica los puntos extremos de operación del sistema en términos de caudales y altura dinámica.

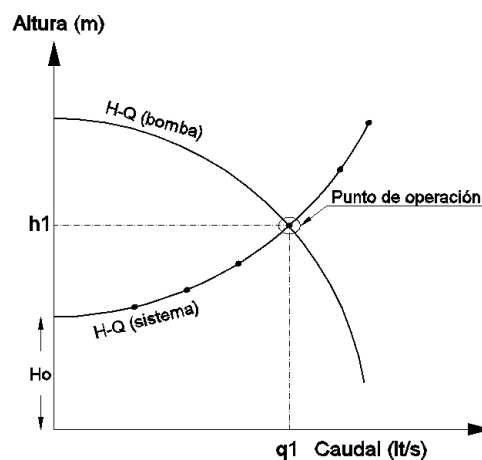


Gráfico N° 31. Punto de operación de una bomba

En el rango de operación de la bomba, debe presentar eficiencias de operación superiores al 60%; de lo contrario, es conveniente modificar los diámetros de las tuberías o cambiar la bomba. Al variar el diámetro de la tubería de impulsión o succión, se modifica la curva característica del sistema, incrementando o disminuyendo las pérdidas de energía.

CAPITULO III

DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

3.1 Introducción

El presente capítulo tiene como finalidad el diseño del banco de pruebas para pérdidas de carga por fricción y por accesorios.

Antes de iniciar la realización del diseño se propone que el banco hidráulico se construirá en panel en acero (tol) pintado para evitar la corrosión.

En cuanto al tablero está formado por un sistema de cuatro ramales de tuberías, mas un ramal que contiene distintos accesorios colocadas en serie. La configuración física de las tuberías son en paralelo estas tuberías difieren tanto en material como en diámetro, esta elección se ha realizado de acuerdo a la demanda comercial y la utilización de las mismas.

El quipo permite hacer una circulación del fluido (agua) por diferentes ramales independientemente gracias a que en el sistema se posee válvulas de restricción de caudal, mediante el cierre y apertura de las mismas se logra tener los siguientes sistemas hidráulicos:

1. Un sistema en el cual se obtendrá las pérdida de carga por fricción en tubería de PVC roscable de diámetro nominal 1".
2. Un sistema en el cual se obtendrá las pérdida de carga por fricción en tubería de PVC roscable de diámetro nominal 1/2".
3. Un sistema en el cual se obtendrá las pérdida de carga por fricción en tubería de Hierro galvanizado de diámetro nominal 1/2".

4. Un sistema en el cual se obtendrá la pérdida de carga por fricción en tubería de cobre de diámetro nominal 1/2".
5. Pérdidas de carga en los siguientes accesorios:
 - ✓ Válvula de bola de media vuelta
 - ✓ Válvula de globo.
 - ✓ Válvula de compuerta.
 - ✓ Codo estándar de 45°
 - ✓ Válvula de retención o check tipo giratorio convencional.
 - ✓ Universal
 - ✓ Codo estándar de 90°
 - ✓ Codo curvo de 90°
6. Un sistema en el cual se obtendrá la pérdida de carga de toda la configuración física propuesta en el tablero hidráulico.

Cada uno de los sistemas se analizará por separado siguiendo su propio recorrido y considerando las pérdidas por fricción de tubería y accesorios, la cual detalla más adelante.

Tabla N°10. Características físicas y mecánicas de Tuberías

Descripción	Diámetro Nominal (pulg)	Diámetro Exterior (mm)	Espesor de pared (mm)	Diámetro Interno (mm)	Presión de Trabajo (PSI)
Cobre templete rígido (tipo "M")	1/2"	15.88	0.711	14.45	806
PVC (cédula 80)	1"	33.40	4.55	24.30	320
PVC (cédula 80)	1/2"	21.34	3.73	13.88	420
Hierro Galvanizado (cédula 40)	1"	33.40	3.38	26.64	735
Hierro Galvanizado (cédula 40)	1/2"	21.30	2.77	15.76	735

Fuente: Catálogo técnico de diferentes proveedores de estos materiales

3.2 Partes del banco de pruebas

El esquema del gráfico N° 32 corresponde al banco de pruebas propuesto para medir las pérdidas de carga en tuberías y accesorios.

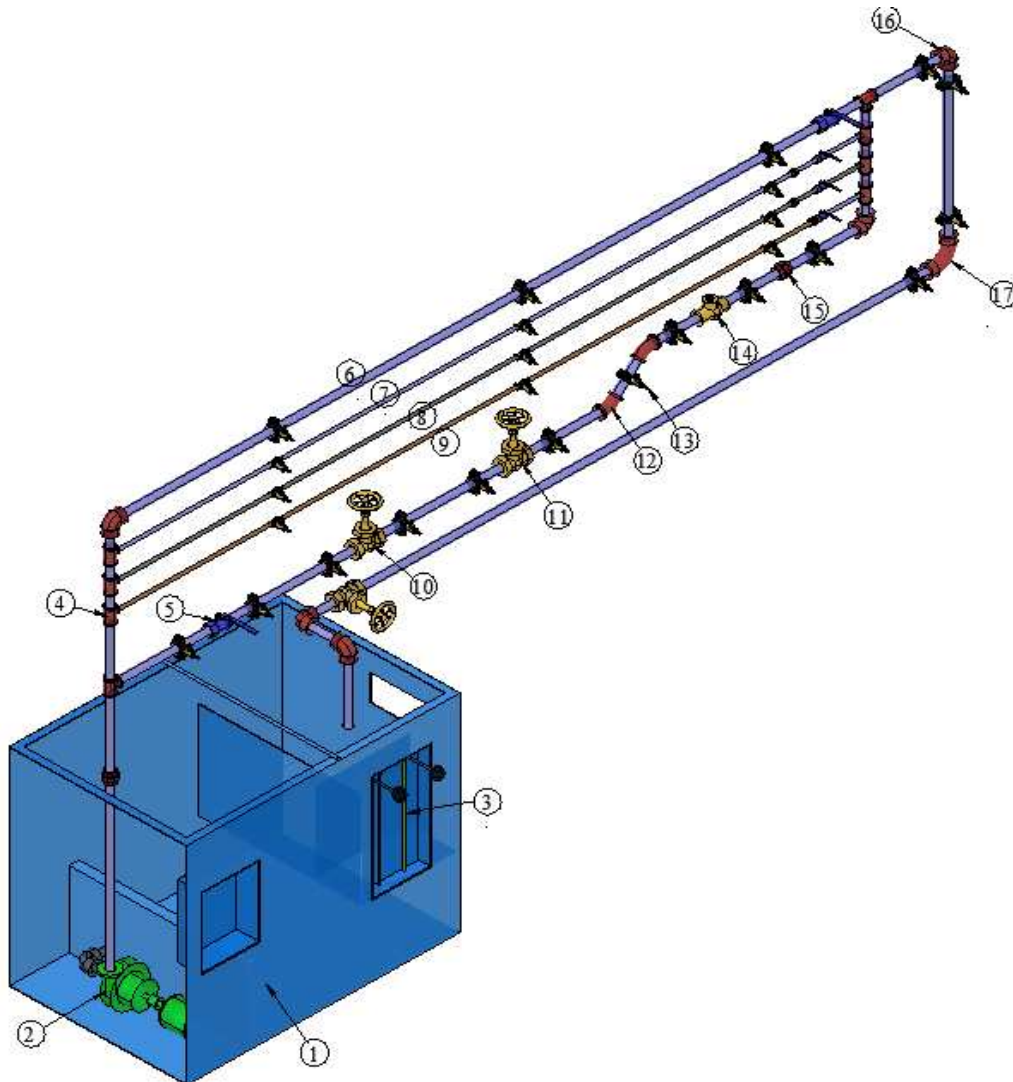


Gráfico N° 32. Plano tridimensional de banco de pruebas.

El banco de pruebas que muestra la configuración física consta de los siguientes elementos:

1. Baco hidráulico con su respetivo tanque de almacenamiento
2. Bomba
3. Sistemas de dos tanques provisionales (para realizar aforos)
4. Te reductora PVC roscable 1" x 1/2"
5. Válvula de bola
6. Tubería de 1" CED 80 PVC

7. Tubería de 1/2 " CED 80 PVC
8. Tubería de 1/2" CED 40 HIERRO GALVANIZADO
9. Tubería de 1/2" COBRE
10. Válvula de Compuerta
11. Válvula de Globo
12. Codos estándar 45°
13. Tomas de presión
14. Válvula de Retención (Check)
15. Universal para tubería
16. Codo estándar 90°
17. Codo curvo 90°

3.3 Velocidad mínima en tuberías

Teniendo en cuenta que en el equipo transporta agua limpia que no puede contener material sedimentable pero sin embargo debido a que el tanque de almacenamiento del banco hidráulico va ha estar en contacto directo al aire libre por seguridad se establece que la velocidad mínima sea de 0.60m/s.

3.4 Velocidad máxima en tuberías

La velocidad máxima debe limitarse según el material del conducto y del material transportado por el agua, con el objeto de evitar erosión del conducto. Es necesario consultar los catálogos de la tubería para definir la velocidad máxima recomendada.

Tabla N°11. Limites máximos de velocidad para conductos a presión.

Materiales de las paredes	Velocidad máxima (m/s)
Hormigón (simple o armado)	4.5 a 5.0
Hierro fundido y hierro dúctil	4.0 a 5.0
Asbesto-cemento	4.5 a 5.0
Acero	6
Cerámica vitrificada	4.0 a 6.0
Plástico	4.5

3.5. Condiciones y fluido en las que va a trabajar el equipo.

Como fluido utilizaremos agua, dado que el banco de pruebas estará en Quito se usará una temperatura promedio de 15°C y una presión atmosférica de 546mmHg = 10.41Psi. Con estas condiciones las propiedades del agua son:

Masa específica (ρ) = 999.10 kg/m³

Peso específico (γ) = 9798 N/m³

Viscosidad dinámica (μ) = 1.14 x 10⁻³ kg/m.s

Viscosidad cinemática (ν) = 1.14 x 10⁻⁶ m²/s

3.6. Determinación de la curva de operación sistema.

El objetivo es determinar la curva del sistema hidráulico para los diferentes recorridos del fluido y la potencia que requiere la bomba para el caso más crítico.

Para calcular las pérdidas de energía entre dos puntos utilizamos la ecuación general de la energía.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_A = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (h_f + h_m)$$

Donde: $\frac{P}{\gamma}$ = Carga de presión

$\frac{v^2}{2g}$ = Carga de velocidad

z = Carga de elevación

h_A = Carga total sobre la bomba o altura dinámica total de bombeo (TDH)

Realizando la simplificación de la ecuación de energía para todos los sistemas hidráulicos o trayectorias de análisis se obtiene la siguiente ecuación compacta:

$$h_A = (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (h_f + h_m)$$

Los Términos que valen cero:

P1= 0 (Superficie del tanque expuesta a la atmosfera)

P2= 0 (Descarga libre del fluido expuesto a la atmosfera)

v1= 0 (Aproximadamente el área del deposito es grande)

Para todos los sistemas en análisis la altura estática se tomara a partir del eje de la tubería de succión, debido a que nivel de agua en el tanque de almacenamiento llega a una altura máxima de 10cm con respecto al eje de la bomba hasta el extremo inferior de la tubería de descarga descendente.

De acuerdo a con la justificación expuesta anteriormente, la altura estática total para todos los casos será de 70cm.

Para realizar la curva del sistema será necesario hacer los cálculos variando los caudales de diseño. Para nuestro caso se empezara el cálculo desde un caudal mínimo de 0.10lt/s variando en un intervalo de 0.10 hasta un caudal máximo 1.08lt/s, con el objetivo de que dicha curva sea más notoria.

El proceso de cálculo se realizara paso a paso para la trayectoria 1 y para las demás trayectorias se presentarán únicamente los resultados obtenidos utilizando el mismo procedimiento.

3.6.1 Trayectoria 1

En esta trayectoria el fluido circulara por dos tramos y ciertos accesorios que se indican en el siguiente gráfico.

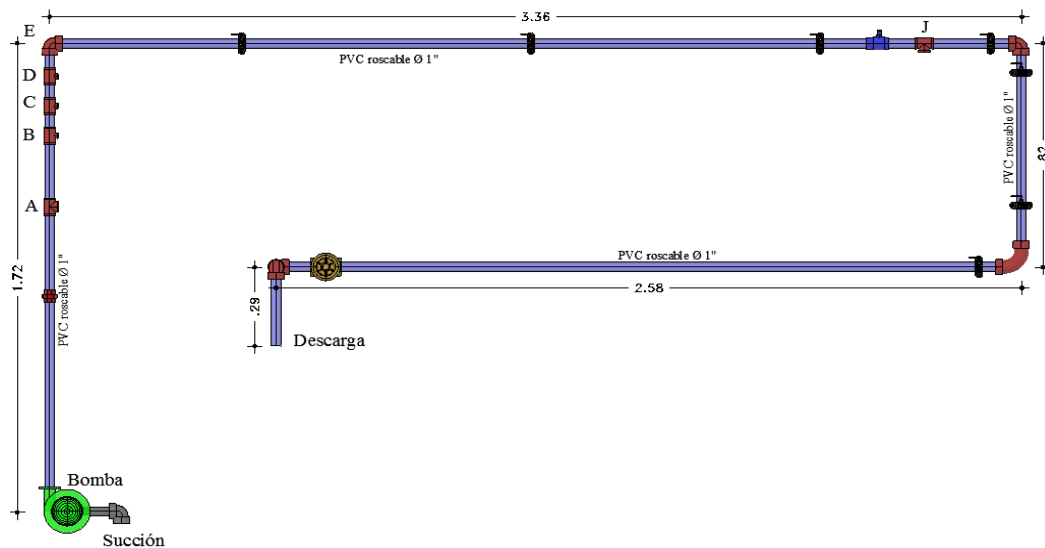


Gráfico N°33. Trayectoria 1 del sistema.

Caudal propuesto = 0. 1 lt/s

A continuación se explica todo el proceso de cálculo con el caudal propuesto de 0.1lt/s.

Pérdidas de energía por fricción de tubería (h_f)

El procedimiento aplicado para su determinación el siguiente:

1. Determinar el material y diámetro de tubería del sistema. Si existen dos o mas tramos que difieran sea en diámetro o en material se analizara independiente cada uno de ellos.
2. Determinar la longitud de cada tramo.
3. Determinar el diámetro interno de tubería (tabla N° 10).
4. Con la ayuda de la ecuación de continuidad determinamos la velocidad del fluido.
5. Calcular el número de Reynolds, pero antes obtener la viscosidad cinemática para el agua para las condiciones antes señaladas.
6. Calcular la rugosidad relativa (ϵ/D_i). Pero antes obtener la rugosidad absoluta ϵ (tabla N° 3).
7. Con la obtención del número de Reynolds y la rugosidad relativa obtenemos el coeficiente de fricción f para lo cual hay dos

métodos el primero con la ayuda del diagrama universal de Moody (anexo 1) o con la ayuda de las ecuaciones empíricas.

8. Calcular las pérdidas por fricción para cada tramo con la ecuación de Darcy-Weisbach.
9. Finalmente para obtener la pérdida de energía por fricción del sistema hidráulico se realizara la sumatoria de las pérdidas por fricción para cada tramo.

En la tabla N° 12 se resume el cálculo de las pérdidas de energía por fricción del sistema hidráulico, para la trayectoria 1 con el caudal propuesto de 0.1lt/s.

Tabla N° 12. Pérdidas de energía por fricción de tubería - trayectoria 1

Tramo	Tubería	L (m)	Di (mm)	v (m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	h _{fi} (m)
Succión - Bomba	H.G. 1"	0.20	26.60	0.179	4197	0.15	0.0056	0.046	0.001
Bomba - Descarga	PVC 1"	8.77	24.30	0.216	4601	0.005	0.0002	0.039	0.033
hf =									0.034

Pérdidas de energía por accesorios (hm)

El procedimiento para calcular la pérdida de energía que causan los diferentes accesorios de un sistema es:

1. Determinar el material y diámetro de tubería del sistema. Si existen dos o mas tramos donde están acoplados los accesorios, que difieran sea en diámetro o en material se analizara independiente cada uno de ellos.
2. Determinar la cantidad de accesorios similares en el tramo.
3. Determinar el diámetro interno de tubería (tabla N° 10) de cada tramo donde se acoplaran los accesorios.
4. Con la ayuda de la ecuación de continuidad determinamos la velocidad del fluido.

5. En la tabla N°5 encontrar (Le/Di) para la válvula o accesorio.
6. Para tubo de cualquier material donde esta acoplado el accesorio de análisis:
 - ✓ Calcular la rugosidad relativa (ϵ/Di) del tubo.
 - ✓ Emplear el diagrama de Moody (anexo 1), para determinar f_T en la zona de turbulencia completa.
7. Calcular el coeficiente de resistencia (K) con la siguiente ecuación:

$$K = f_T (Le/Di).$$
8. Calcular $h_m = K (v^2/2g)$, donde v es la velocidad en el tubo.

En la tabla N° 13 se resume el cálculo de las pérdidas de energía por accesorios del sistema hidráulico, para la trayectoria 1 con el caudal propuesto de 0.1lt/s.

Tabla N°13. Pérdidas de energía por accesorios - trayectoria 1

Tramo	Accesorios	Cant	Di (mm)	v (m/s)	(Le/Di)	ε/D	f _T	K	h _{mi} (m)
Succión - Bomba	Codo estándar 90°	2	26.60	0.179	30	0.0056	0.032	0.95	0.003
	Universal	1			6			0.19	0.000
Bomba - Descarga	Universal	1	24.30	0.216	6	0.0002	0.014	0.08	0.000
	Te estándar (con flujo directo)	2			20			0.28	0.001
	Te reductora (con flujo directo)	3			20			0.28	0.002
	Codo estándar 90°	4			30			0.42	0.004
	Válvula de Bola	1			150			2.08	0.005
	Codo curvo 90°	1			20			0.28	0.001
	Válvula de Compuerta	1			8			0.11	0.000
	hm =								

Cálculo de la altura dinámica total de bombeo

En resumen la altura dinámica total de bombeo se puede calcular con la siguiente expresión:

$$TDH = H_o + P + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (h_f + h_m)$$

Donde: TDH = Altura dinámica total de bombeo (m.c.a).

H_o = Altura estática (m.c.a).

P = Energía de presión (m.c.a).

$\frac{v^2}{2g}$ = Energía de velocidad en la descarga (m.c.a).

En donde para todos los sistemas $P = 0$ debido a que no se necesita una presión adicional en la entrega del líquido. En la siguiente tabla indica un resumen de la altura dinámica total obtenida para diferentes caudales de bombeo, siguiendo la trayectoria 1.

Tabla N° 14. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 1

Q (lt/s)	H_o (m)	$v^2/2g$ (m)	h_f (m)	h_m (m)	TDH (m)
0.00	0.70	--	--	--	0.70
0.10		0.002	0.03	0.02	0.75
0.20		0.009	0.11	0.07	0.89
0.30		0.021	0.23	0.15	1.10
0.40		0.038	0.37	0.27	1.38
0.50		0.059	0.56	0.42	1.73
0.60		0.085	0.77	0.60	2.16
0.70		0.116	1.01	0.82	2.65
0.80		0.152	1.28	1.07	3.21
0.90		0.192	1.59	1.35	3.83
1.00		0.237	1.92	1.67	4.53
1.08		0.277	2.20	1.95	5.13

Gráfica de la curva del sistema

Con la tabla anterior se obtiene la curva del sistema (caudal vs altura dinámica total de bombeo).

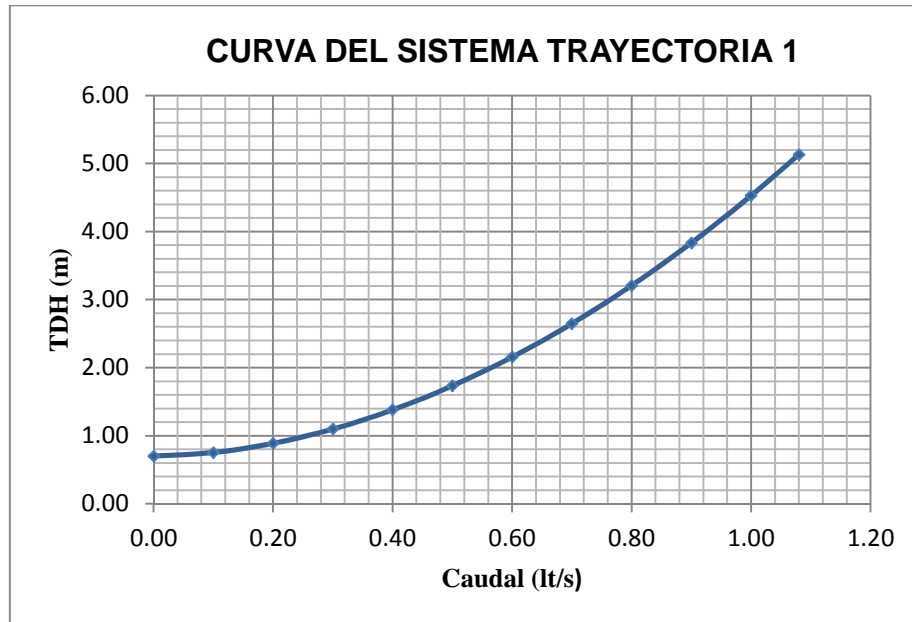


Gráfico N° 34. Curva de operación del sistema - trayectoria 1

3.6.2 Trayectoria 2

En esta trayectoria el fluido circulara por cuatro tramos y ciertos accesorios que se indican en el siguiente gráfico.

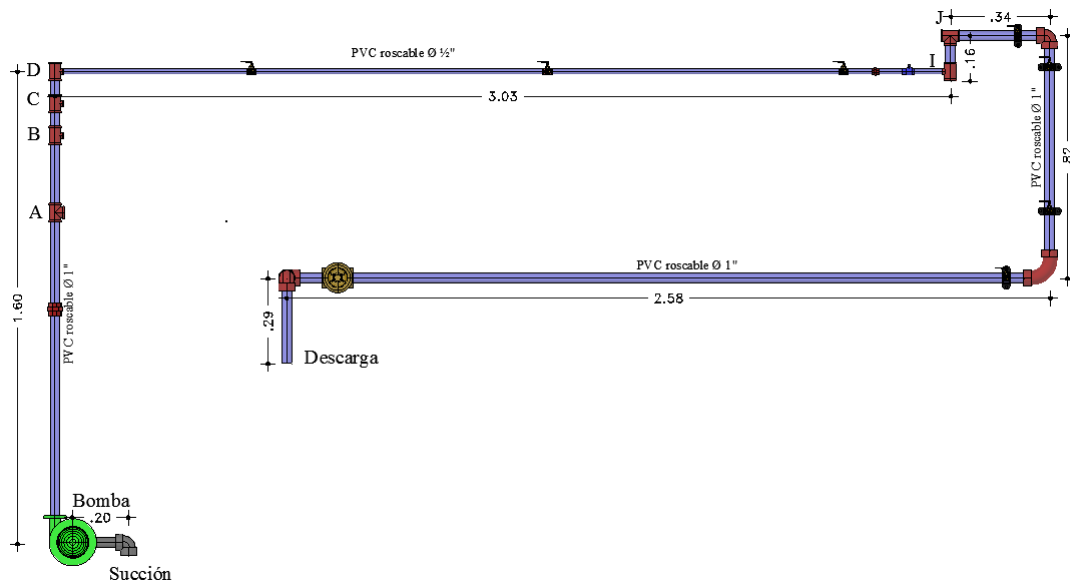


Gráfico N° 35. Trayectoria 2 del sistema.

El procedimiento de cálculo de este tramo es similar al anterior con la diferencia que este tramo nos permitirá analizar la pérdida que genera

cierta longitud de tubería de PVC ½". En la siguiente tabla indica un resumen de la altura dinámica total obtenida para diferentes caudales de bombeo, siguiendo la trayectoria 2.

Tabla N°15. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 2

Q (lt/s)	Ho (m)	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0.00	0.70	--	--	--	0.70
0.10		0.0024	0.19	0.13	1.02
0.20		0.0095	0.62	0.51	1.84
0.30		0.0213	1.27	1.15	3.14
0.40		0.0379	2.12	2.05	4.91
0.50		0.0593	3.17	3.20	7.13
0.60		0.0853	4.41	4.61	9.81
0.70		0.1162	5.84	6.28	12.93
0.80		0.1517	7.45	8.20	16.50
0.90		0.1920	9.24	10.38	20.51
1.00		0.2371	11.22	12.81	24.96
1.08		0.2765	12.92	14.94	28.84

Con la tabla anterior se obtiene la curva del sistema para la trayectoria 2.

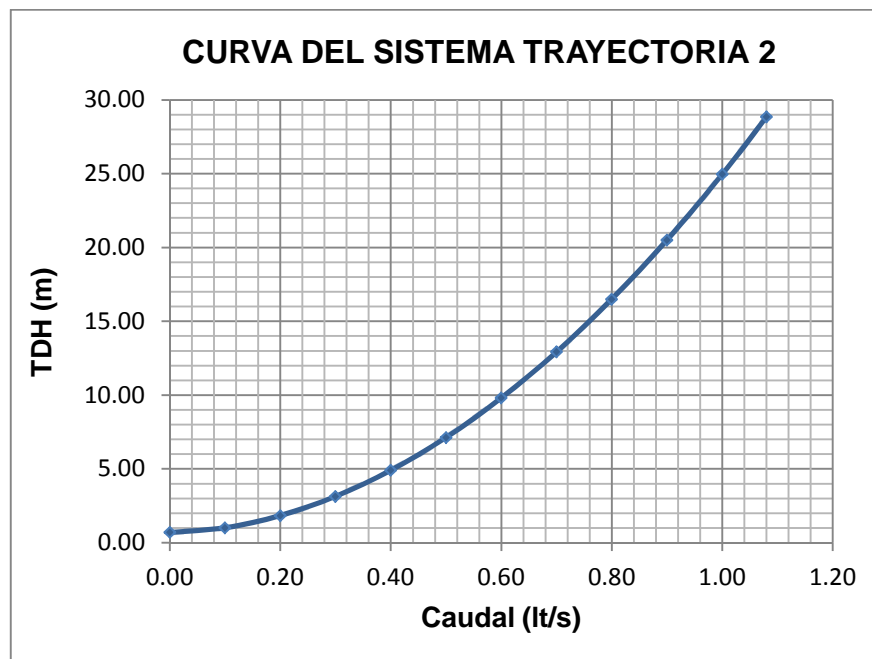


Gráfico N°36. Curva de operación del sistema - trayectoria 2

3.6.3 Trayectoria 3

En esta trayectoria el fluido circulara por cuatro tramos y ciertos accesorios que se indican en el siguiente gráfico.

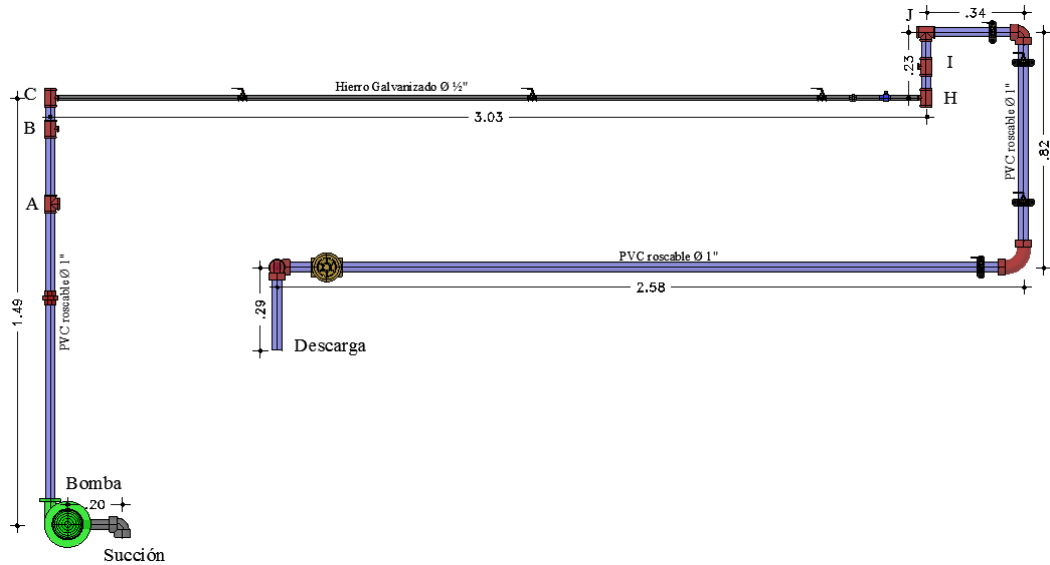


Gráfico N°37. Trayectoria 3 del sistema.

El procedimiento de cálculo de este tramo es similar a las anteriores con la diferencia que este tramo nos permitirá analizar las pérdida que genera cierta longitud de tubería de hierro galvanizado 1/2". En la siguiente tabla indica un resumen de la altura dinámica total obtenida para diferentes caudales de bombeo, siguiendo la trayectoria 3.

Tabla N°16. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 3

Q (lt/s)	Ho (m)	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0.00	0.70	--	--	--	0.70
0.10		0.0024	0.14	0.18	1.02
0.20		0.0095	0.51	0.72	1.93
0.30		0.0213	1.09	1.61	3.43
0.40		0.0379	1.89	2.87	5.50
0.50		0.0593	2.91	4.48	8.15
0.60		0.0853	4.14	6.46	11.38
0.70		0.1162	5.58	8.79	15.18
0.80		0.1517	7.23	11.48	19.56
0.90		0.1920	9.10	14.53	24.52
1.00		0.2371	11.18	17.93	30.05
1.08		0.2765	12.99	20.92	34.89

Con la tabla anterior se obtiene la curva del sistema para la trayectoria 3.

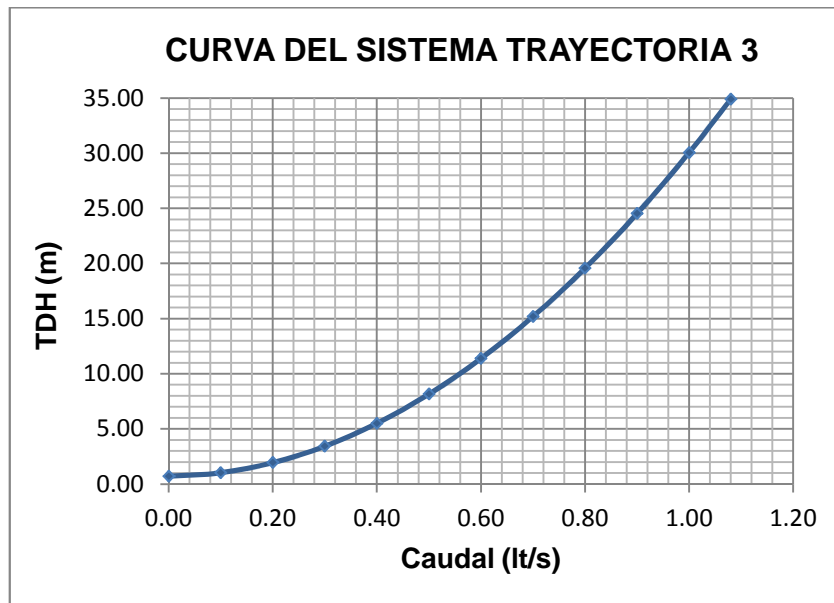


Gráfico N° 38. Curva de operación del sistema - trayectoria 3.

3.6.3 Trayectoria 4

En esta trayectoria el fluido circulara por cuatro tramos y ciertos accesorios que se indican en el siguiente gráfico.

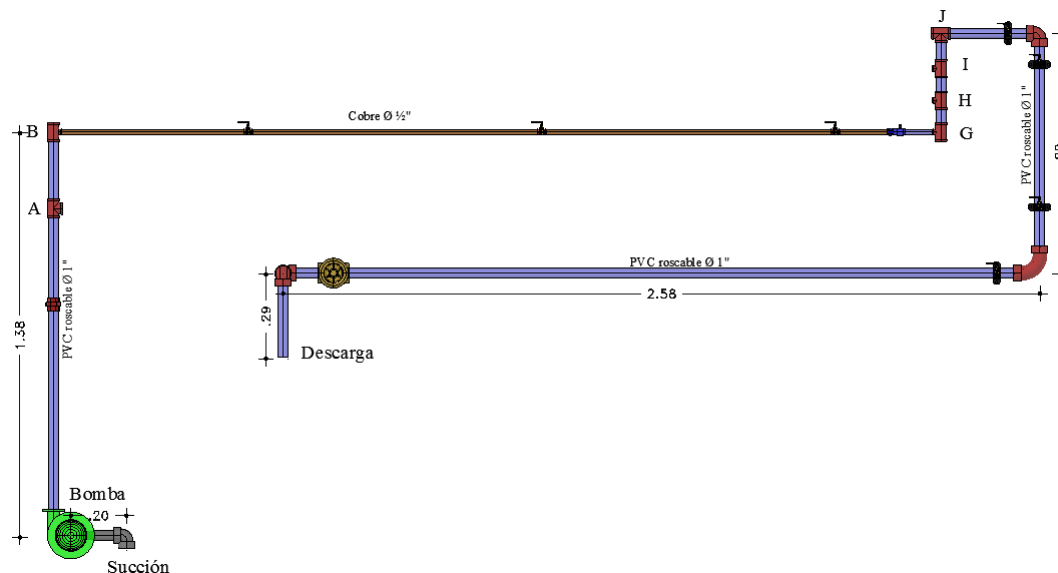


Gráfico N° 39. Trayectoria 4 del sistema.

El procedimiento de cálculo de este tramo es similar a las anteriores con la diferencia que este tramo nos permitirá analizar las pérdida que genera

cierta longitud de tubería de cobre ½". En la siguiente tabla indica un resumen de la altura dinámica total obtenida para diferentes caudales de bombeo, siguiendo la trayectoria 4.

Tabla N° 17. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 4

Q (lt/s)	Ho (m)	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0.00	0.70	--	--	--	0.70
0.10		0.0024	0.16	0.09	0.95
0.20		0.0095	0.52	0.36	1.58
0.30		0.0213	1.05	0.80	2.57
0.40		0.0379	1.74	1.42	3.90
0.50		0.0593	2.59	2.22	5.57
0.60		0.0853	3.59	3.20	7.57
0.70		0.1162	4.72	4.35	9.89
0.80		0.1517	6.00	5.68	12.54
0.90		0.1920	7.42	7.19	15.51
1.00		0.2371	8.97	8.88	18.79
1.08		0.2765	10.31	10.36	21.65

Con la tabla anterior se obtiene la curva del sistema para la trayectoria 4.

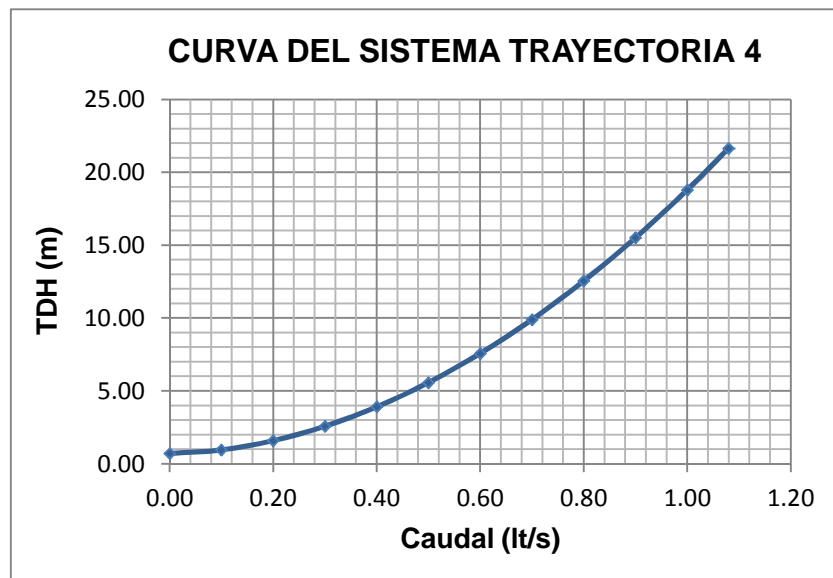


Gráfico N° 40. Curva de operación del sistema - trayectoria 4.

3.6.5 Trayectoria 5

En esta trayectoria el fluido circulara por dos tramos y ciertos accesorios que se indican en el siguiente gráfico.

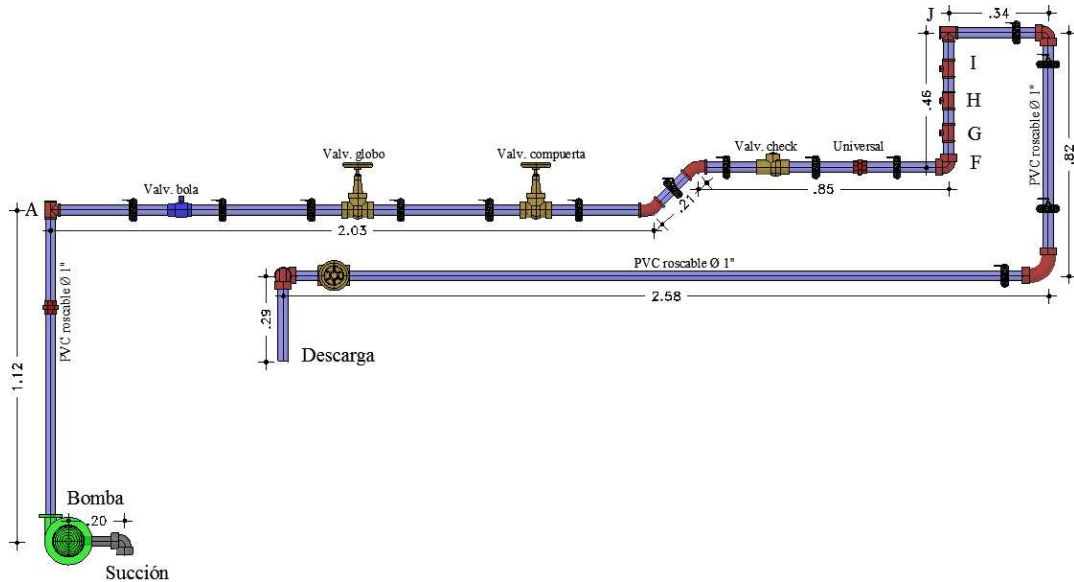


Gráfico N°41. Trayectoria 5 del sistema.

El procedimiento de cálculo de este tramo es similar a las anteriores con la diferencia que este tramo nos permitirá analizar las pérdida que genera cierta longitud de tubería de PVC 1" y algunas válvulas o accesorios. En la siguiente tabla indica un resumen de la altura dinámica total obtenida para diferentes caudales de bombeo, siguiendo la trayectoria 5.

Tabla N°18. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 5

Q (lt/s)	Ho (m)	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0.00	0.70	--	--	--	0.70
0.10		0.0024	0.03	0.03	0.77
0.20		0.0095	0.11	0.13	0.96
0.30		0.0213	0.22	0.30	1.25
0.40		0.0379	0.37	0.54	1.65
0.50		0.0593	0.55	0.84	2.15
0.60		0.0853	0.76	1.21	2.76
0.70		0.1162	1.00	1.65	3.47
0.80		0.1517	1.27	2.16	4.28
0.90		0.1920	1.57	2.73	5.20
1.00		0.2371	1.90	3.37	6.21
1.08		0.2765	2.19	3.93	7.10

Con la tabla anterior se obtiene la curva del sistema para la trayectoria 5.

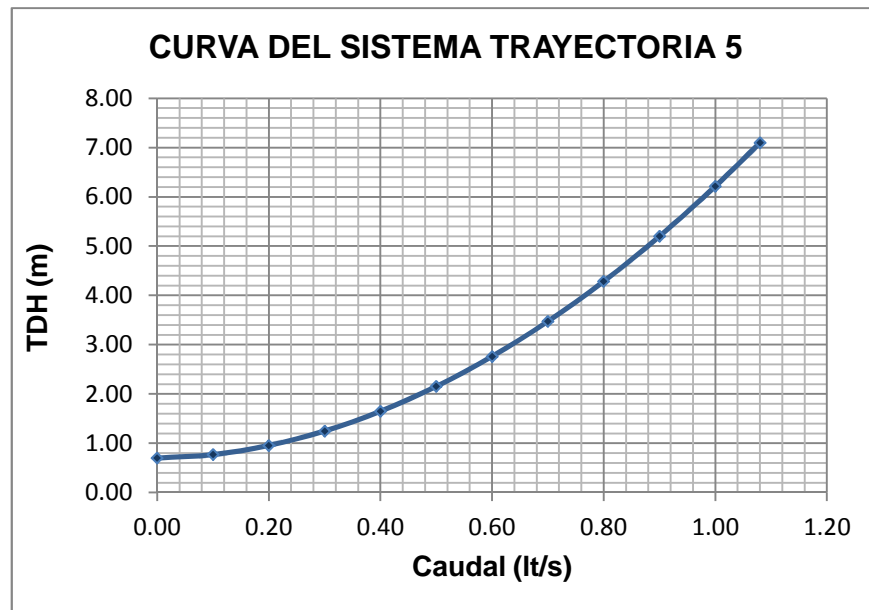


Gráfico N° 42. Curva de operación del sistema - trayectoria 5.

3.6.5 Trayectoria 6

En esta trayectoria el fluido circulara por toda la configuración física propuesta en el tablero.

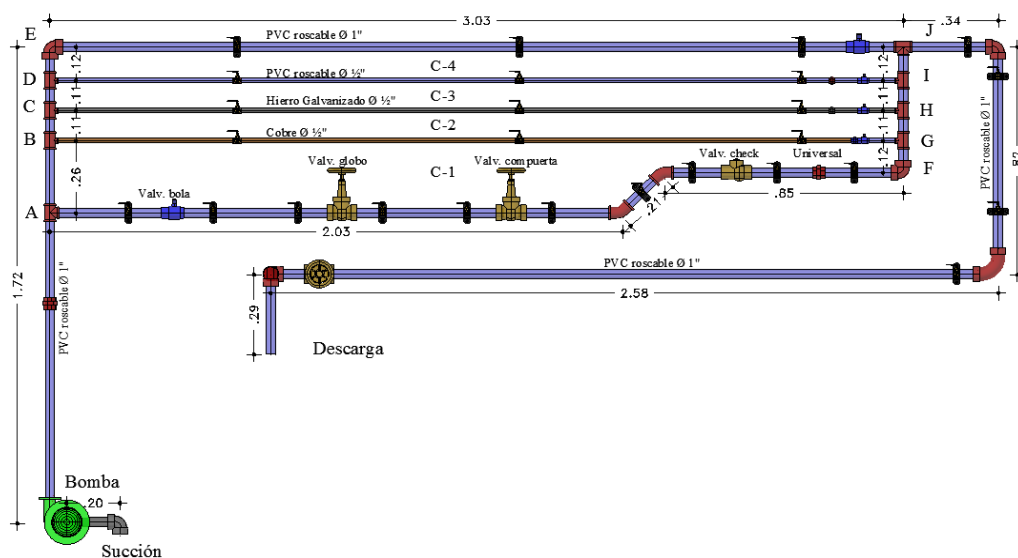


Gráfico N° 43. Trayectoria 6 del sistema.

El procedimiento de cálculo de este sistema es diferente a todas las anteriores, en especial los tramos en donde las tuberías están ubicadas en paralelo. A continuación se indica el método de solución para sistemas de tuberías dispuestas en paralelo cuya configuración es similar a redes cerradas.

3.6.5.1 Método de Hardy-Cross

El método que permitirá la solución de circuitos cerrados es conocido como la “técnica iterativa de Cross” requiere estimaciones iniciales de caudal en cada ramal del sistema. Este método está basado en el cumplimiento de dos consideraciones:

- ✓ En cada intersección de la red la suma de los flujos que entran es igual a la suma de los que salen.
- ✓ El fluido tiende a seguir la trayectoria de resistencia mínima a través de la red. Por tanto, una tubería que tenga un valor menor de k conducirá un flujo mayor que aquellos con valores más altos.

Para el caso de este tipo de redes, que no existen demanda de agua se deberá cumplir con la ley de continuidad de masa en los nudos, es decir que el caudal que entra a la red (Q_e) será igual al caudal de salida de la misma (Q_s).

Antes de comenzar el proceso de iteración, es necesario definir el número de circuitos cerrados que son 4 para nuestro caso (Gráfico N° 44). La convención de signos para cada circuito es:

- ✓ *Si el flujo en una tubería dada de un circuito va en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj, Q y h son positivas.*
- ✓ *Si el flujo va en sentido contrario del movimiento de las manecillas del reloj Q y h son negativas.*

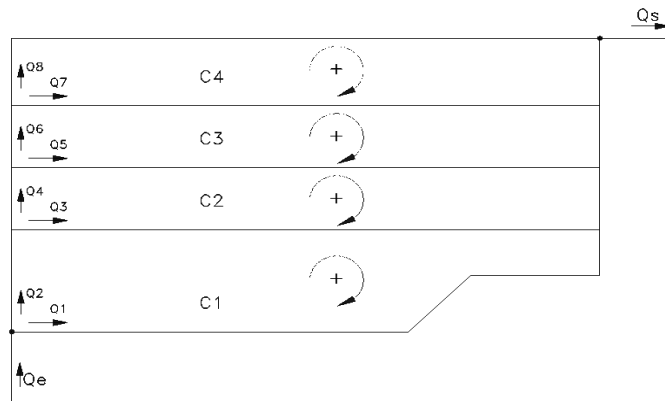


Gráfico N° 44. Circuito cerrado para análisis de redes de tuberías.

Entonces, para el circuito 1 del gráfico anterior h_2 y Q_2 son positivas, h_1 y Q_1 son negativas. Los signos tienen importancia para hacer el cálculo correcto de los ajustes de los caudales, que se denota con $q_{\text{corregido}}$, y que se realiza al final de cada iteración. Observe que la tubería 3, 5, 7 es común a ambos circuitos. Por tanto, a ésta deben aplicarse los ajustes $q_{\text{corregido}}$ para cada circuito.

A continuación se presenta paso a paso la técnica de Cross para analizar el flujo en redes de tubería para un caudal propuesto de 1.00lt/s.

1. Dividir la red en series de circuitos cerrados.
2. Determinar el material y diámetro de tubería del sistema. Si existen dos o mas tuberías que difieran sea en diámetro o en material se analizara independiente de cada uno de ellos.
3. Determinar la longitud de cada tramo.
4. Suponer un valor de caudal en cada tubería, de modo que el flujo que entra a cada intersección sea igual al flujo que sale de ella.
5. Determinar el diámetro interno de tubería de cada tramo (tabla N° 10)
6. Con la ayuda de la ecuación de continuidad determinamos la velocidad del fluido.
7. Determinar el coeficiente de resistencia por fricción de tubería (k_f) y por accesorios (K_m) para cada tramo con los procedimientos aplicados para la trayectoria 1.

8. Sumar K_f y K_m para determinar el coeficiente total de resistencia (K)
9. Expresar la pérdida de energía en cada tubería, en la forma $(hf+hm) = KQ^2$.
10. Para cada tubería, calcular la pérdida de carga $(hf+hm) = KQ^2$ con el uso del valor supuesto de Q .
11. Proceder alrededor de cada circuito para sumar algebraicamente todos los valores de $(hf+hm)$, con la siguiente convención de signos:
12. Si el flujo va en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj, h y Q son positivas.
13. Si el flujo va en sentido contrario del movimiento de las manecillas del reloj, h y Q son negativas.
14. La suma resultante se denota con $\sum(hf+hm)$.
15. Para cada tubería, calcular $2KQ$.
16. Sumar todos los valores de $2kQ$ para cada circuito, con la suposición de que todos son positivos. Esta suma se denota con $\sum(2kQ)$.
17. Para cada circuito, calcular el valor de $q_{\text{corregido}}$.

$$q_{\text{corr}} = \frac{\sum(hf + hm)}{\sum(2KQ)}$$

18. Para cada tubería, calcular una estimación nueva de Q .

$$Q' = Q - q_{\text{corregido}}$$

19. Repetir los pasos 10 a 17 hasta que $q_{\text{corregido}}$ del paso 17 sea insignificante. El valor Q' se utiliza para la iteración siguiente.

En la tabla N°19 se resume el cálculo de las pérdidas de energía para las redes cerradas del sistema hidráulico, siguiendo la trayectoria 6 con el caudal propuesto de 1.00lt/s. Y se realizó 45 iteraciones para tener una buena aproximación de caudal.

Tabla N°19. Cálculo de redes cerradas por el método iterativo de Hardy-Cross

Iter	Cicui	Tramo	Long. (m)	Q (lt/s)	Diámetro		v (m/s)	Pérdidas por fricción				Pérdidas por accesorios				K	$\Sigma(hf+hm) = KQ^2$	2KQ	q _{corregido} (lt/s)
					Nominal (pulg)	Interior (mm)		Re	ϵ/Di	f	k _f (m)	$\Sigma(Le/Di)$	f _T	Σk_i	k _m (m)				
1	C-1	AB	0.26	0.700	PVC 1	26.6	1.26	29420	0.0017	0.028	45001	60	0.023		223325	268326	0.13	375.66	0.0812
		BG*	3.03	0.250	Cu 1/2	14.453	1.52	19338	0.0001	0.026	10440304	216	0.012		4943268	15383572	0.96	7691.79	
		AF	3.09	-0.300	PVC 1	26.6	0.54	12608	0.0017	0.032	617878	616	0.023		2292800	2910678	-0.26	1746.41	
		FG	0.12	-0.300	PVC 1	26.6	0.54	12608	0.0017	0.032	23995	60	0.023		223325	247320	-0.02	148.39	
																	0.81	9962.24	
	C-2	BC	0.11	0.450	PVC 1	26.6	0.81	18913	0.0017	0.030	20398	60	0.023		223325	243722	0.05	219.35	-0.0072
		CH*	3.03	0.200	HG 1/2	15.76	1.03	14187	0.0095	0.042	10811021	216	0.037		10789232	21600252	0.86	8640.10	
		BG*	3.03	-0.250	Cu 1/2	14.453	1.52	19338	0.0001	0.026	10440304	216	0.012		4943268	15383572	-0.96	7691.79	
		GH	0.11	-0.550	PVC 1	26.6	0.99	23115	0.0017	0.029	19735	60	0.023		223325	243060	-0.07	267.37	
																	-0.12	16818.60	
	C-3	CD	0.11	0.250	PVC 1	26.6	0.45	10507	0.0017	0.033	22842	60	0.023		223325	246167	0.02	123.08	-0.0172
		DI*	3.03	0.150	PVC 1/2	13.88	0.99	12082	0.0033	0.035	16981645	216	0.027		12947283	29928927	0.67	8978.68	
		CH*	3.03	-0.200	HG 1/2	15.76	1.03	14187	0.0095	0.042	10811021	216	0.037		10789232	21600252	-0.86	8640.10	
		HI	0.11	-0.750	PVC 1	26.6	1.35	31521	0.0017	0.028	18858	60	0.023		223325	242183	-0.14	363.27	
																	-0.31	18105.14	
	C-4	DE	0.12	0.100	PVC 1	26.6	0.18	4203	0.0017	0.042	31223	30	0.023		111662	142886	0.00	28.58	-0.0881
		EJ	3.03	0.100	PVC 1	26.6	0.18	4203	0.0017	0.042	788389	150	0.023		558312	1346701	0.01	269.34	
		DI*	3.03	-0.150	PVC 1/2	13.88	0.99	12082	0.0033	0.035	16981645	216	0.027		12947283	29928927	-0.67	8978.68	
		IJ	0.12	-0.900	PVC 1	26.6	1.62	37825	0.0017	0.027	20091	60	0.023		223325	243416	-0.20	438.15	
																	-0.86	9714.74	

Iteración 2

2	C-1	AB	0.26	0.619	PVC 1	26.6	1.11	26008	0.0017	0.028	45812	60	0.023	223325	269137	0.10	333.09	0.0101
		BG*	3.03	0.162	Cu 1/2	14.453	0.98	12499	0.0001	0.029	11660049	216	0.012	4943268	16603316	0.43	5365.79	
		AF	3.09	-0.381	PVC 1	26.6	0.69	16020	0.0017	0.031	590116	616	0.023	2292800	2882916	-0.42	2197.82	
		FG	0.12	-0.381	PVC 1	26.6	0.69	16020	0.0017	0.031	22917	60	0.023	223325	246242	-0.04	187.72	
																0.08	8084.43	
	C-2	BC	0.11	0.457	PVC 1	26.6	0.82	19217	0.0017	0.030	20342	60	0.023	223325	243667	0.05	222.82	0.0233
		CH*	3.03	0.190	HG 1/2	15.76	0.97	13480	0.0095	0.042	10863467	216	0.037	10789232	21652699	0.78	8229.32	
		BG*	3.03	-0.162	Cu 1/2	14.453	0.98	12499	0.0001	0.029	11660049	216	0.012	4943268	16603316	-0.43	5365.79	
		GH	0.11	-0.543	PVC 1	26.6	0.98	22812	0.0017	0.029	19777	60	0.023	223325	243101	-0.07	263.90	
																0.33	14081.83	
	C-3	CD	0.11	0.267	PVC 1	26.6	0.48	11230	0.0017	0.033	22523	60	0.023	223325	245848	0.02	131.38	-0.0502
		DI*	3.03	0.079	PVC 1/2	13.88	0.52	6373	0.0033	0.040	19223506	216	0.027	12947283	32170789	0.20	5090.88	
		CH*	3.03	-0.190	HG 1/2	15.76	0.97	13480	0.0095	0.042	10863467	216	0.037	10789232	21652699	-0.78	8229.32	
		HI	0.11	-0.733	PVC 1	26.6	1.32	30798	0.0017	0.028	18918	60	0.023	223325	242243	-0.13	355.03	
																-0.69	13806.61	
	C-4	DE	0.12	0.188	PVC 1	26.6	0.34	7905	0.0017	0.036	26557	30	0.023	111662	138219	0.00	51.99	-0.0523
		EJ	3.03	0.188	PVC 1	26.6	0.34	7905	0.0017	0.036	670555	150	0.023	558312	1228867	0.04	462.25	
		DI*	3.03	-0.079	PVC 1/2	13.88	0.52	6373	0.0033	0.040	19223506	216	0.027	12947283	32170789	-0.20	5090.88	
		IJ	0.12	-0.812	PVC 1	26.6	1.46	34124	0.0017	0.027	20356	60	0.023	223325	243681	-0.16	395.70	
																-0.31	6000.82	

Iteración 45

45	C-1	AB	0.26	0.683	PVC 1	26.6	1.23	28697	0.0017	0.028	45160	60	0.023	223325	268485	0.13	366.64	0.0000
		BG*	3.03	0.103	Cu 1/2	14.453	0.63	7956	0.0001	0.033	13177655	216	0.012	4943268	18120923	0.19	3727.79	
		AF	3.09	-0.317	PVC 1	26.6	0.57	13332	0.0017	0.032	611074	616	0.023	2292800	2903874	-0.29	1842.25	
		FG	0.12	-0.317	PVC 1	26.6	0.57	13332	0.0017	0.032	23731	60	0.023	223325	247056	-0.02	156.73	
																0.00	6093.42	
	C-2	BC	0.11	0.580	PVC 1	26.6	1.04	24374	0.0017	0.029	19574	60	0.023	223325	242898	0.08	281.73	0.0000
		CH*	3.03	0.082	HG 1/2	15.76	0.42	5796	0.0095	0.047	12097099	216	0.037	10789232	22886330	0.15	3739.85	
		BG*	3.03	-0.103	Cu 1/2	14.453	0.63	7956	0.0001	0.033	13177655	216	0.012	4943268	18120923	-0.19	3727.79	
		GH	0.11	-0.420	PVC 1	26.6	0.76	17655	0.0017	0.030	20643	60	0.023	223325	243968	-0.04	204.96	
																0.00	7954.34	
	C-3	CD	0.11	0.498	PVC 1	26.6	0.90	20940	0.0017	0.029	20052	60	0.023	223325	243376	0.06	242.52	0.0000
		DI*	3.03	0.068	PVC 1/2	13.88	0.45	5505	0.0033	0.041	19870024	216	0.027	12947283	32817306	0.15	4485.70	
		CH*	3.03	-0.082	HG 1/2	15.76	0.42	5796	0.0095	0.047	12097099	216	0.037	10789232	22886330	-0.15	3739.85	
		HI	0.11	-0.502	PVC 1	26.6	0.90	21088	0.0017	0.029	20029	60	0.023	223325	243353	-0.06	244.21	
																0.00	8712.28	
	C-4	DE	0.12	0.430	PVC 1	26.6	0.77	18067	0.0017	0.030	22429	30	0.023	111662	134091	0.02	115.29	0.0000
		EJ	3.03	0.430	PVC 1	26.6	0.77	18067	0.0017	0.030	566328	150	0.023	558312	1124640	0.21	966.94	
		DI*	3.03	-0.068	PVC 1/2	13.88	0.45	5505	0.0033	0.041	19870024	216	0.027	12947283	32817306	-0.15	4485.70	
		IJ	0.12	-0.570	PVC 1	26.6	1.03	23961	0.0017	0.029	21409	60	0.023	223325	244734	-0.08	279.05	
																0.00	5846.98	

Con la iteración 45 se observa que la columna de $q_{\text{corregido}}$ es tan pequeña que tiende a 0.00 lt/s. Por lo tanto se da por terminada la iteración, obteniendo una pérdida para los cuatro circuitos de 1.499 m.c.a

Con estos resultados obtenidos para la iteración 45 se procede a calcular la pérdida total para todo el sistema hidráulico como se indica a continuación.

Tabla N°20. Pérdidas de energía por fricción de tubería - trayectoria 6

Tramo	Tubería	L (m)	Di (mm)	v (m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	h _{fi} (m)
Succión - Bomba	H.G. 1"	0.20	26.64	1.794	41965	0.15	0.0056	0.034	0.042
Bomba - Descarga	PVC 1"	1.12	24.300	2.156	46006	0.005	0.0002	0.022	0.240
Redes de tubería	--	--	--	--	--	--	--	--	1.499
G - Descarga	PVC 1"	4.03	24.300	2.156	46006	0.005	0.0002	0.022	0.862
hf =									2.642

Tabla N°21. Pérdidas de energía por accesorios - trayectoria 6

Tramo	Accesorios	Cant	Di (m)	v (m/s)	(Le/Di)	ε/D	f _T	K	hmi (m)
Succión - Bomba	Codo estándar 90°	2	26.640	1.794	30	0.0056	0.032	0.95	0.313
	Universal	1			6			0.19	0.031
Bomba - A	Universal	1	24.300	2.156	6	0.0002	0.014	0.08	0.020
J- Descarga	Codo estándar 90°	3	24.300	2.156	30	0.0002	0.014	0.42	0.296
	Codo curvo 90°	1			20			0.28	0.066
	Válvula de Compuerta	1			8			0.11	0.026
hm =									0.752

Finalmente se calculara la altura dinámica total (TDH) con los procedimientos aplicados para los casos anteriores. En la siguiente tabla

indica un resumen de la altura dinámica total obtenida para diferentes caudales de bombeo, siguiendo la trayectoria 6.

Tabla N°22. Cálculo de la curva de operación del sistema - trayectoria 6

(lt/s)	Ho (m)	$v^2/2g$	hf (m)	hm (m)	HDT (m)
0.00	0.70	--	--	--	0.70
0.10		0.0024	0.040	0.01	0.75
0.20		0.0095	0.137	0.03	0.88
0.30		0.0213	0.285	0.07	1.07
0.40		0.0379	0.482	0.12	1.34
0.50		0.0593	0.727	0.19	1.67
0.60		0.0853	1.019	0.27	2.08
0.70		0.1162	1.357	0.37	2.54
0.80		0.1517	1.740	0.48	3.07
0.90		0.1920	2.169	0.61	3.67
1.00		0.2371	2.642	0.75	4.33
1.08		0.2765	3.053	0.88	4.91

Con la tabla anterior se obtiene la curva del sistema para la trayectoria 6.

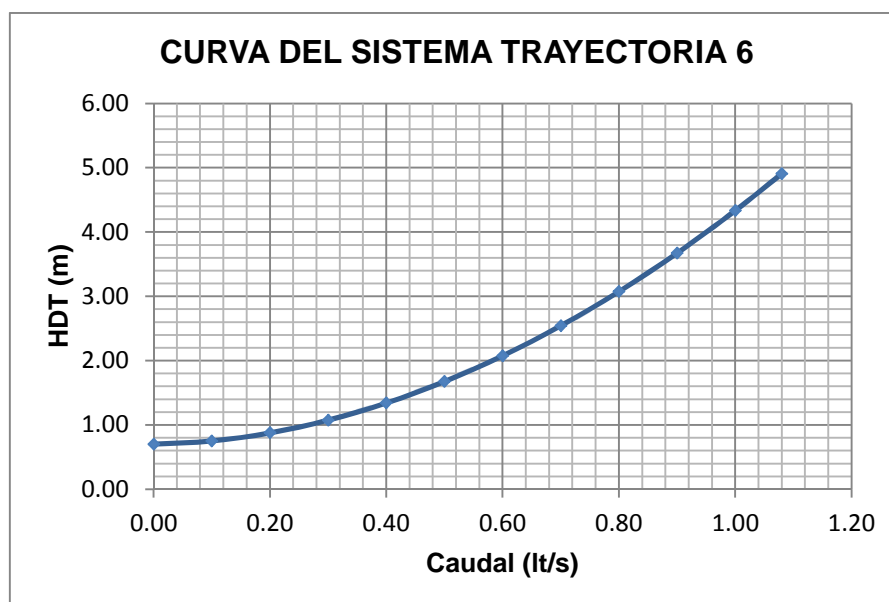


Gráfico N°45. Curva de operación del sistema – trayectoria 6.

3.7 Resumen de curvas de operación del sistema.

A continuación se presenta un resumen de curvas de operación del sistema hidráulico para las diferentes trayectorias de flujo.

Tabla N°23. Resumen de curvas de operación del sistema

Q (lt/s)	HDT (m)					
	Trayectoria 1	Trayectoria 2	Trayectoria 3	Trayectoria 4	Trayectoria 5	Trayectoria 6
0.00	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
0.10	0.75	1.02	1.02	0.95	0.77	0.75
0.20	0.89	1.84	1.93	1.58	0.96	0.88
0.30	1.10	3.14	3.43	2.57	1.25	1.07
0.40	1.38	4.91	5.50	3.90	1.65	1.34
0.50	1.73	7.13	8.15	5.57	2.15	1.67
0.60	2.16	9.81	11.38	7.57	2.76	2.08
0.70	2.65	12.93	15.18	9.89	3.47	2.54
0.80	3.21	16.50	19.56	12.54	4.28	3.07
0.90	3.83	20.51	24.52	15.51	5.20	3.67
1.00	4.53	24.96	30.05	18.79	6.21	4.33
1.08	5.13	28.84	34.89	21.65	7.10	4.91

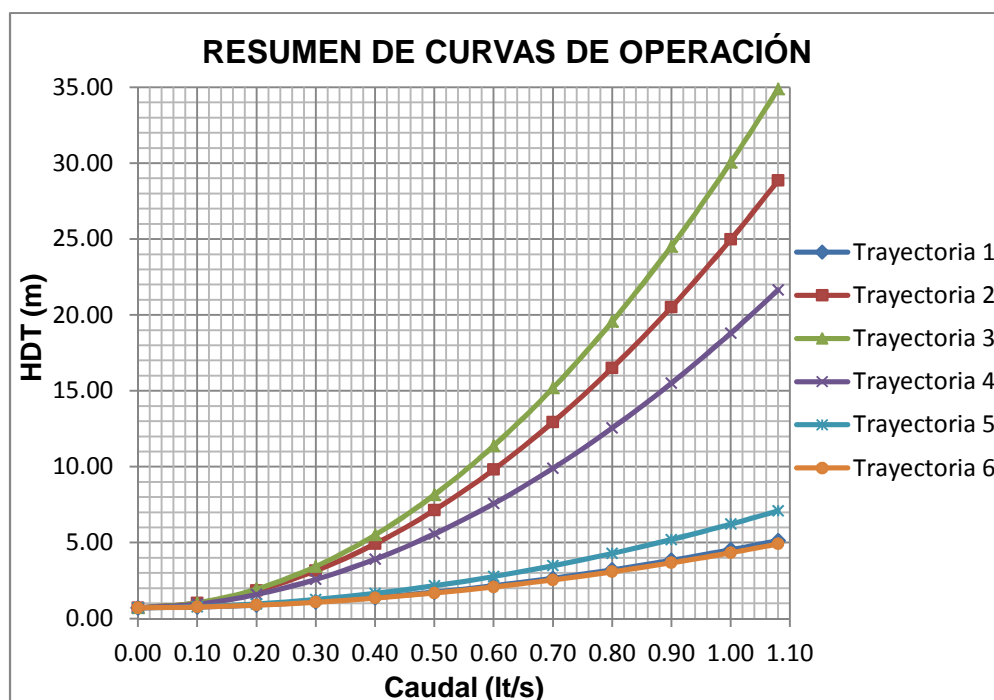


Gráfico N°46. Resumen de curva de operación del sistema.

Como podemos observar el resumen de curvas de operación, siguiendo independientemente las deferentes trayectorias del fluido, la curva del sistema hidráulico conformado por tubería de hierro galvanizado presenta la mayor pérdida de energía, por lo tanto la trayectoria 3 será el caso más crítico con el cual se debe seleccionar la potencia de la bomba.

3.8 Selección de la bomba

La bomba apropiada se seleccionara además del cálculo teórico que se indica a continuación, tomando en cuenta el siguiente criterio: una bomba que entregue al menos el caudal de diseño, contra la altura dinámica total a dicho caudal esto se obtiene utilizando las curvas características que se encuentran en catálogos que ofrecen los diferentes proveedores de bombas.

3.8.1 Cálculo de la potencia de la bomba

Para la determinación de la potencia transmitida por la bomba al fluido, se aplicará la siguiente ecuación.

$$P_b = \frac{Q * TDH * \gamma}{750 * \eta}$$

Donde: P_b = Potencia a la entrada de la bomba (HP)

Q = Capacidad o caudal de la bomba (lt/s).

TDH = Altura dinámica total de bombeo (m).

γ = Peso específico del fluido (kN/m³).

750 = Coeficiente para transformación de unidades.

η = Eficiencia del conjunto motor bomba, para el caso presente todos sistemas hidráulicos tomaremos el 60%, ya que esta dentro del rango recomendado (60-90%) por la referencia bibliográfica 2.

El caudal máximo que utilizaremos para el bombeo será 1.00 lt/s y su correspondiente altura dinámica total es de 30.05m (trayectoria 3), que es el caso donde se tiene las mayores pérdidas de energía.

Entonces la potencia de la bomba necesaria para hacer circular el agua siguiendo la trayectoria 3 es de:

$$P_b = \frac{1.00(\text{lt/s}) * (30.05\text{m}) * 9.798(\text{kN/m}^3)}{750 * 0.60}$$
$$P_b = 0.65 \text{ HP}$$

Por lo tanto comercialmente se necesitara una bomba de 1.00 HP.

Dentro del mercado encontramos bombas de 1HP de marca TEMCO modelo JSW/10H con las siguientes características:



Gráfico N°47. Bomba TEMCO modelo JSW/10H

Esta es una bomba centrífuga que viene acoplada a un motor eléctrico de características adecuadas para dar la potencia necesaria para los requerimientos de flujo y carga que requiere la bomba; por esa razón se les llama motobombas. Están construidas para aplicaciones tales como:

- ✓ Suministro de agua potable para viviendas,
- ✓ Aplicaciones industriales varias, etc.

3.8.2 Curva de característica de la bomba.

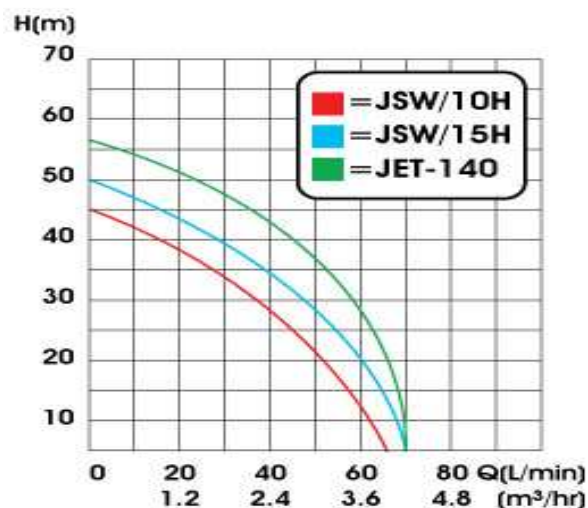


Gráfico N° 48. Curva Características - bomba TEMCO modelo JSW/10H

A continuación se exponen algunas características generales de este tipo de bombas.

Tabla N° 24. Características generales de la bomba TEMCO modelo JSW/10H

Modelo	HP	KW	R.P.M.	Q (max) (l/min)	H (max) (m)	Succión (m)	Diamet. Ent. - Sal.	Pres. Max. PSI / BAR
JSW/10H	1	0.75	3450	65	45	8	1" X 1"	63.9 / 4.4

* 110/220V - 60Hz.

* Los valores de presión son aproximados.

3.8.3 Punto de operación

El punto de operación de la bomba será la intersección entre la curva del sistema y la curva de la bomba.

El punto de operación para la primera trayectoria es:

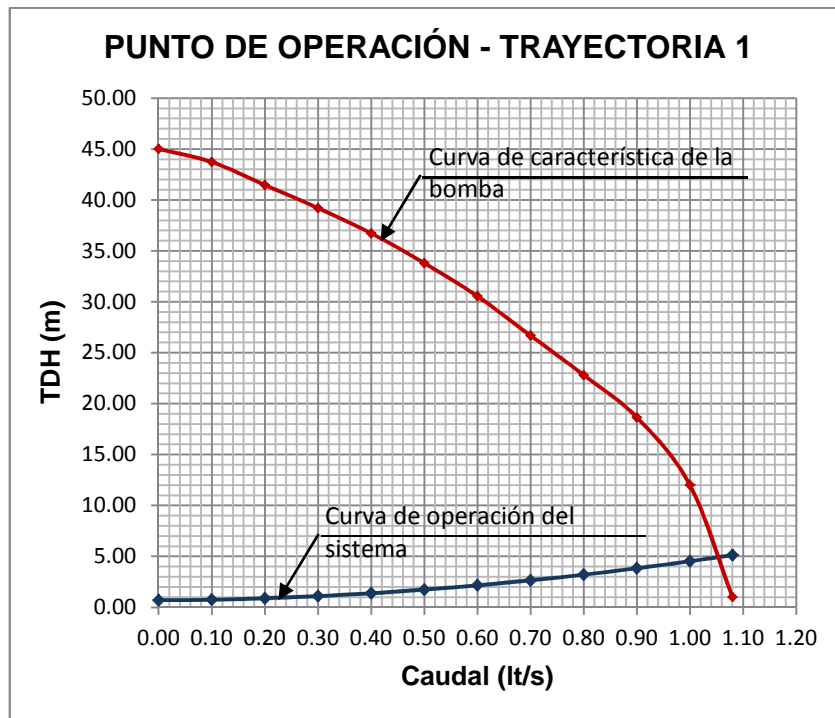


Gráfico N° 49. Punto de operación - trayectoria 1

Se observa que para la trayectoria 1 el punto de operación corresponde a un caudal de 1.05lt/s y una altura dinámica total de 5.00m.

El punto de operación para la segunda trayectoria es:

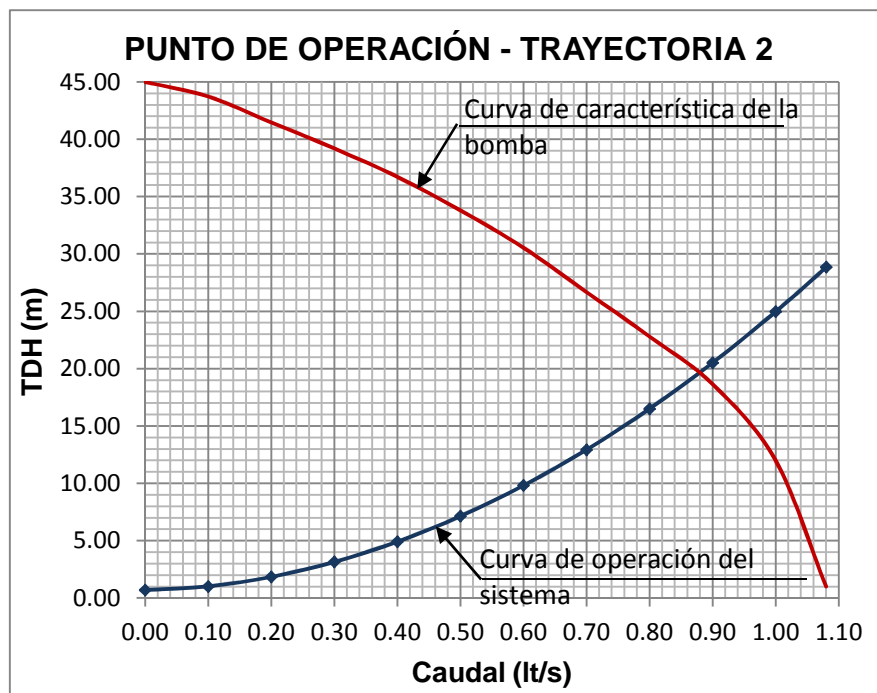


Gráfico N° 50. Punto de operación - trayectoria 2

Se observa que para la trayectoria 2 el punto de operación corresponde a un caudal de 0.88lt/s y una altura dinámica total de 19.50m.

El punto de operación para la tercera trayectoria es:

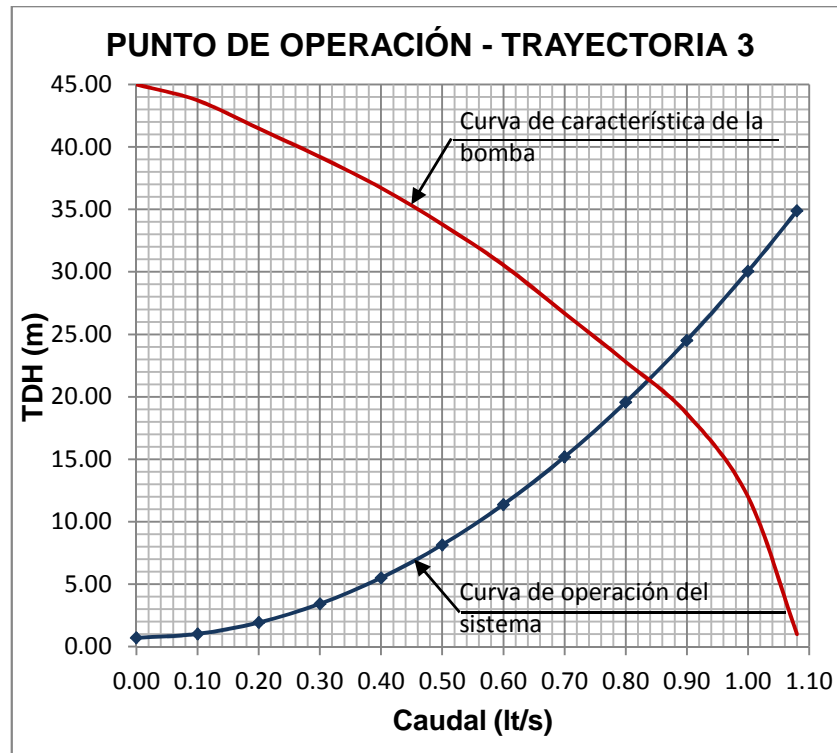


Gráfico N°51. Punto de operación - trayectoria 3

Se observa que para la trayectoria 3 el punto de operación corresponde a un caudal de 0.84lt/s y una altura dinámica total de 21.20m.

El punto de operación para la cuarta trayectoria es:

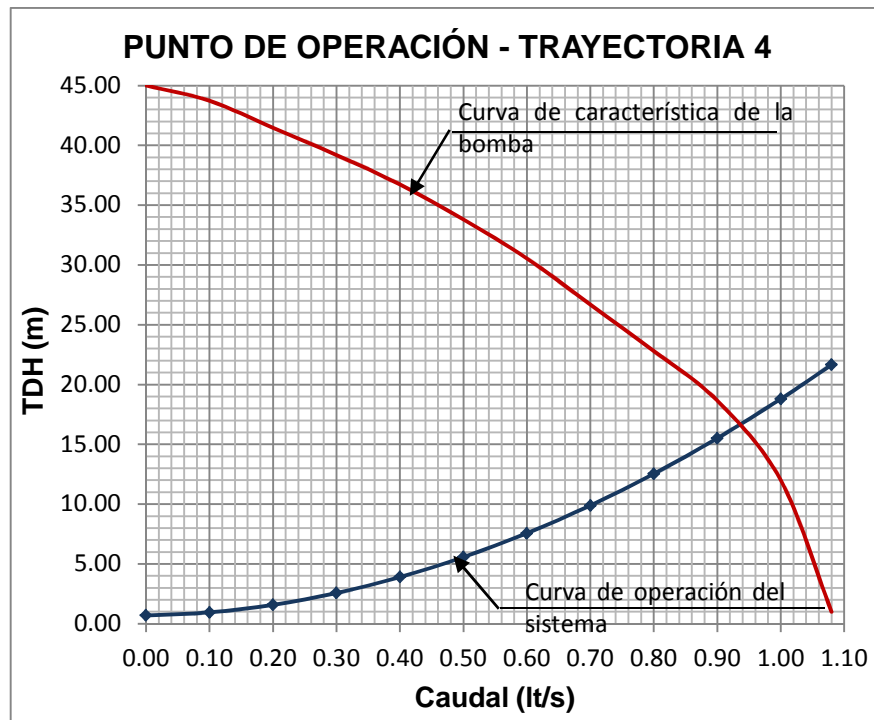


Gráfico N°52. Punto de operación - trayectoria 4

Se observa que para la trayectoria 4 el punto de operación corresponde a un caudal de 0.94lt/s y una altura dinámica total de 16.80m

El punto de operación para la quinta trayectoria es:

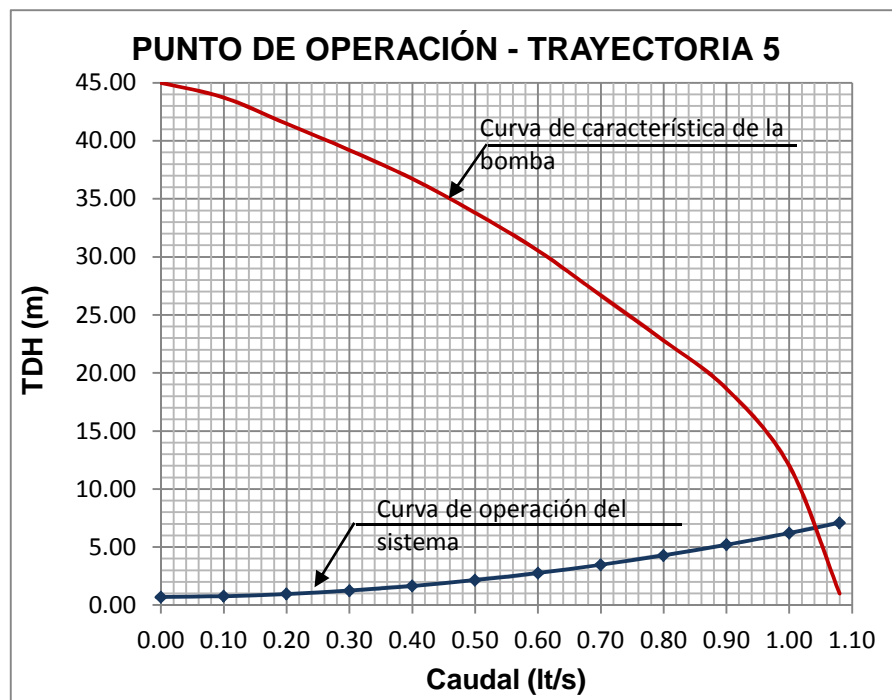


Gráfico N°53. Punto de operación - trayectoria 5

Se observa que para la trayectoria 5 el punto de operación corresponde a un caudal de 1.04lt/s y una altura dinámica total de 6.60m

El punto de operación para la sexta trayectoria es:

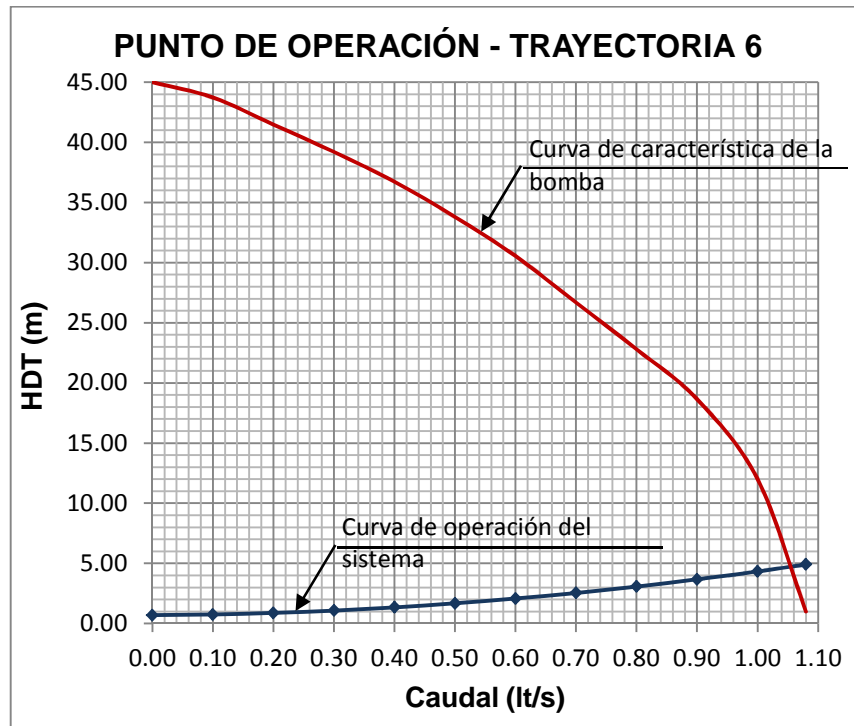


Gráfico N°54. Punto de operación - trayectoria 6

Se observa que para la trayectoria 6 el punto de operación corresponde a un caudal de 1.06lt/s y una altura dinámica total de 4.90m

3.9 Tanque de almacenamiento

Para garantizar que exista fluido dentro del banco de pruebas se seleccionó un tanque de almacenamiento, con una capacidad de 98 565 cm³ o 98.57 litros, que esta incorporado en el banco hidráulico, cuyo material utilizado es tol galvanizado, el cual debe ser revestido con pintura anticorrosiva.

El tanque será de forma de un paralelepípedo dejando descubierto la parte superior para poder hacer el llenado de la misma.

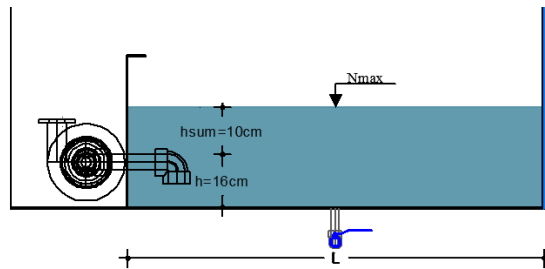


Gráfico N° 55. Corte longitudinal del tanque de almacenamiento.

Adicionalmente, para garantizar que la tubería de succión sea perfectamente hermética y evitar la falla de la bomba por filtraciones de aire en la aspiración, se aumenta la altura del tanque 10cm como se indica en el gráfico N° 55. Obteniéndose un nuevo volumen cuyas dimensiones son:

$$L = 86.40\text{cm}$$

$$B = 71.30\text{cm}$$

$$H = h + H_{\text{sum}} = 16.0 + 10.0 = 26\text{cm}$$

$$V_{\text{tanque}} = L \cdot B \cdot H = 86.40 \cdot 71.30 \cdot 26.00$$

$$V_{\text{tanque}} = 160\,168\text{cm}^3 = 160.17\text{ litros}$$

3.10 Tiempo de vaciado del tanque de almacenamiento

El desagüe para el lavado del tanque se realiza por el fondo.

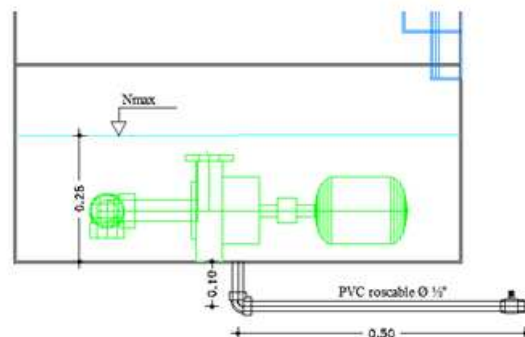


Gráfico N° 56. Esquema de ubicación de la tubería de desagüe.

Carga hidráulica disponible (altura de la lamina del agua sobre la tubería de desagüe) = 0.26m

Se asume un diámetro de tubería HG de ½" (Di = 15.80mm) y se calcula el tiempo de vaciado del tanque de almacenamiento, mediante la siguiente expresión.

$$t_{\text{vaciado}} = \frac{2A_s}{C_d A_o \sqrt{2g}} H^{1/2}$$

Donde: A_s = Área del tanque (m^2)

H = Carga sobre el orificio o altura de la superficie del agua hasta el centro del orificio (m)

A_o = Área del orificio (m^2)

$C_d = C_c * C_v$ = Coeficiente de descarga en el gráfico N° 57 se detalla algunos de estos valores.

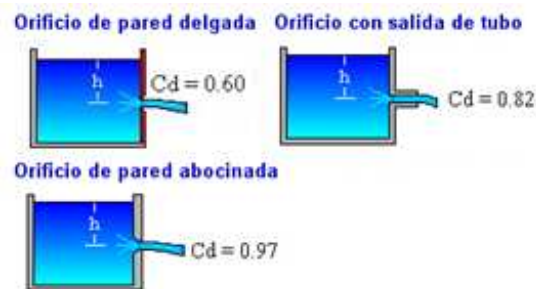


Gráfico N° 57. Coeficiente de descarga.

Aplicando la ecuación anterior se obtiene tiempo de necesario para el vaciado del taque de almacenamiento:

$$t_{\text{vaciado}} = \frac{2(0.864 * 0.713)}{0.82 \left(\frac{\pi * 0.0158^2}{4} \right) \sqrt{2 * 9.806}} 0.26^{1/2}$$

$$t_{\text{vaciado}} = 882s = 14.70min$$

3.11 Selección de manómetros

Para obtener la presión máxima que llegará al manómetro más próximo a la descarga de la bomba (trayectoria 5) se realizara el mismo

procedimiento que se utilizó para la obtención de las curvas del operación sistema, con la diferencia que ahora los puntos de análisis van a estar ubicados como se indica en la gráfico N°58.

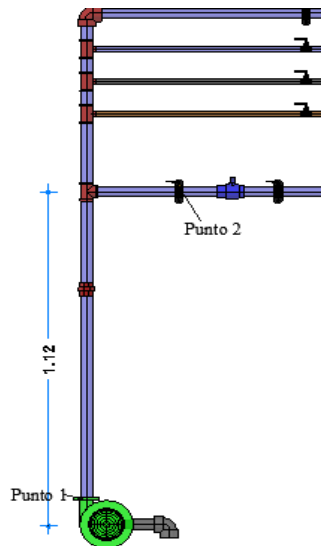


Gráfico N° 58. Presión en manómetros.

Para calcular la diferencia de presión aplicamos nuevamente la ecuación general de energía.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum(h_f + h_m)$$

Considerando que: $z_1 = 0$ por estar a la altura de la referencia, $V_1 = V_2$ por que el diámetro de tubería se mantiene constante y realizando las simplificaciones correspondientes se obtiene la presión que ejerce en el punto 2.

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} - z_2 - \sum(h_f + h_m)$$

Donde el valor de $\frac{P_1}{\gamma}$ es igual a 21.20m.c.a, correspondiente a la mayor

descarga de la bomba (trayectoria 3) y el valor de $\sum(h_f + h_m)$ será calculado desde la descarga de la bomba hasta el punto de prueba más próximo que es de 0.19m.c.a para un caudal de (0.60lt/s).

$$P_2 = (21.20 - 1.12 - 0.19)m * 9798N/m^3$$

$$P_2 = 194882N/m^2 = 28.27PSI$$

En el mercado se encuentra manómetros de diferentes marcas y modelos. Para este tipo de sistemas hidráulicos que necesiten medir presiones con mayor exactitud, es necesario adquirir manómetros con glicerina para evitar las vibraciones de la pluma.

Debido a que la presión que ejerce el agua en el punto de prueba más crítico es baja, se construirá un manómetro de columna de agua que permita medir el diferencial de pérdidas de presiones para cualquier tramo de prueba.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

4.1 Introducción

Dentro del proceso constructivo el presente proyecto está constituido de dos partes, banco hidráulico propiamente dicho y un tablero provisto de un sistema de tubería que permitirá realizar los ensayos de pérdidas de carga por fricción en tuberías y por accesorios.

La construcción del banco hidráulico y el tablero provisto de tuberías fue realizada con materiales que se disponen en el mercado.

4.2 Construcción del banco Hidráulico

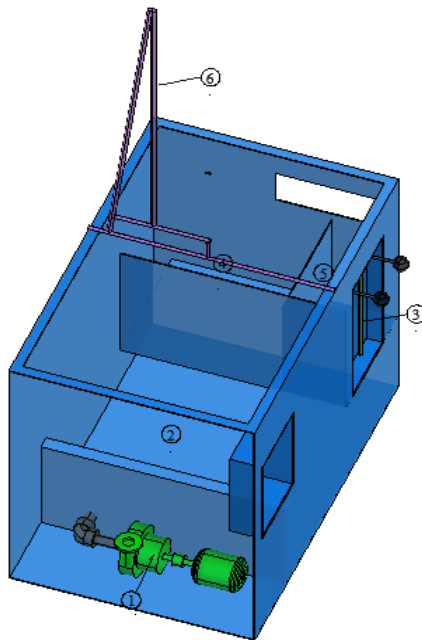


Gráfico N°59. Partes del banco hidráulico

El banco de hidráulico consta de los siguientes elementos:

1. Bomba eléctrica, Temco 1 HP
2. Tanque de almacenamiento.
3. Tubos capilares de 5mm transparente.
4. Tanque provisional para realizar aforo 1
5. Tanque provisional para realizar aforo 2

6. Estructura de apoyo para el tablero.

4.2.1 Materiales utilizados en la construcción del banco hidráulico

A continuación se detalla los materiales utilizados en la construcción del banco hidráulico.

- ✓ Planchas de Tol 2mm
- ✓ Bomba eléctrica, Temco 1 HP
- ✓ Varilla lisa de 14mm
- ✓ Codo 90°HG 1"
- ✓ Neplo HG 1" x 20cm
- ✓ Masilla epóxica Rally 50gramos
- ✓ Pintura
- ✓ Tubería de polietileno transparente 5mm

4.2.2 Herramientas en la construcción del banco hidráulico

Las herramientas y equipos necesarios para su construcción son los siguientes:

- ✓ Suelta eléctrica.
- ✓ Cizalla para cortar tol.
- ✓ Dobladora de tol.
- ✓ Compresor para pintar.
- ✓ Pistola de soplete para pintar.
- ✓ Amoladora de esmeril.
- ✓ Taladro
- ✓ Fresadora eléctrica.
- ✓ Cepillo metálico.
- ✓ Sierra de arco.
- ✓ Flexómetro.
- ✓ Herramienta menor (martillo, alicate, prensas, destornillador, etc.).

4.2.3 Proceso constructivo del banco hidráulico

A continuación se explicara brevemente el proceso constructivo aplicado para el banco hidráulico.

Con los planos y detalles elaborados en la etapa de diseño, se procedió a cortar la plancha de tol de 2mm, de acuerdo a las dimensiones indicadas en la misma.

Se unieron los perfiles cortados con puntos de suelda, esto en el caso de que se produjera un cambio en el diseño o se detectara algún problema en la construcción.

Una vez ajustado los últimos detalles se procede a soldar la estructura de forma definitiva, se agregan dos rigidizadores que den refuerzo a la estructura.

Se perforan los orificios necesarios como es el desagüe del tanque de almacenamiento, el orificio que conecta a la tubería de succión, etc.

Se colocan tubos capilares transparente de 5mm, los mismos que van conectadas independientemente a cada uno de los tanques provisionales.

Se construyen las estructuras para apoyar el tablero con varillas de 14mm, los mismos que van sobre el banco hidráulico y otra de forma independiente.

Se pulen las soldaduras de la estructuras para dar un mejor acabado al banco hidráulico y se procede a pintar la estructura, la cual es aplicada con compresor y pistola.

4.3 Construcción del tablero de pruebas

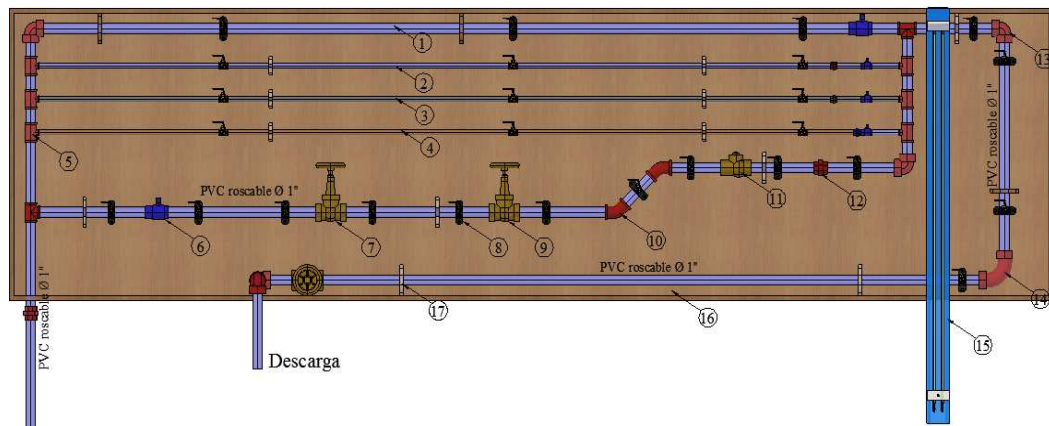








Gráfico N°60. Partes del banco hidráulico

El tablero de pruebas consta de los siguientes elementos:

Tabla N°25. Partes del tablero de pruebas

N°	Descripción	Imagen
1	Tubería de 1" CED 80 PVC	
2	Tubería de 1/2 " CED 80 PVC	
3	Tubería de 1/2" CED 40 HIERRO GALVANIZADO	
4	Tubería de 1/2" COBRE	
5	Tee PVC roscable	
6	Válvula de bola PVC roscable	
7	Válvula compuerta 1"	

8	Válvula de bola con pitón 1/4"	
9	Válvula de globo 1"	
10	Codo 45° PVC roscable	
11	Válvula check	
12	Universal PVC roscable	
13	Codo 90° PVC roscable	
14	Codo curvo 90° PVC roscable	
15	Manómetro de columna de agua	
16	Tableros Plywood 4x8x12 mm	
17	Anclaje de madera	

4.3.1 Materiales utilizados en la construcción del tablero de pruebas

En la construcción del tablero de pruebas, a más de los materiales que se indican en tabla N°25, se utilizaron los siguiente s:

- ✓ Abrazadera acero inoxidable
- ✓ Adaptador macho Cu SOHI 1/2"
- ✓ Bushing reductor HG 1/2" x 1/4"
- ✓ Bushing reductor PVC 1/2" x 1/4"
- ✓ Collar derivación D=32 mm salida 1/2"
- ✓ Pitón de bronce hembra 1/4
- ✓ Sellador IPS plus
- ✓ Teflón 1/2" x 10m
- ✓ Pintura de caucho

4.3.2 Herramientas para la construcción del tablero de pruebas.

A continuación se detalla cada uno de los materiales utilizados en la construcción del tablero de pruebas.

- ✓ Sierra eléctrica de madera.
- ✓ Compresor para pintar.
- ✓ Tarraja de ½ y 1 pulgada
- ✓ Conjunto de llave inglesa
- ✓ Sierra de arco.
- ✓ Flexómetro.
- ✓ Herramienta menor (martillo, alicate, prensas, desatornillador, etc.).

4.3.3 Proceso de constructivo del tablero de pruebas.

A continuación se explicara brevemente el proceso constructivo aplicado para el tablero de pruebas.

Con el respectivo plano y con la ayuda de un plomero se procede a cortar y roscar las tuberías.

Ante la eventual posibilidad de que se produzca filtraciones (fugas) de agua, para los acoples de tuberías con los diferentes accesorios se utilizará sellantes con cinta de plástico insoluble (Teflón).

Las válvulas de globo y de retención (Check) se debe colocar tomando en cuenta la dirección en que circulara el agua.

Una vez culminado el acople del sistema, se realizaron pruebas en todo su conjunto, para lo cual se empleo una bomba hidráulica manual provista de un manómetro.

Antes de la prueba las tuberías fueron selladas mediante tapones provisionales y luego inyectoro agua hasta que el manómetro marque una presión máxima equivalente a una columna estática de agua de 50 psi.

Esta presión se mantuvo por un lapso mínimo de tiempo de 24 horas, luego del cual se procedió a verificar e inspeccionar el sistema. Cualquier descenso de la presión significará la existencia de fugas, que deberán ser reparadas.

Independientemente se construyó el tablero y con sus respectivos anclajes, los mismos que se hicieron de tableros plywood 4x8x12 mm.

Finalmente se instalaron la bomba de 1HP que va ubicado junto al tanque de almacenamiento y acoplada al tablero de pruebas.

CAPÍTULO V

PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL BANCO HIDRAULICO

5.1 Introducción.

En este capítulo se analizará específicamente las pérdidas que se generan en los tramos que se indican a continuación, de acuerdo a las características funcionales para las que fue diseñado el equipo.

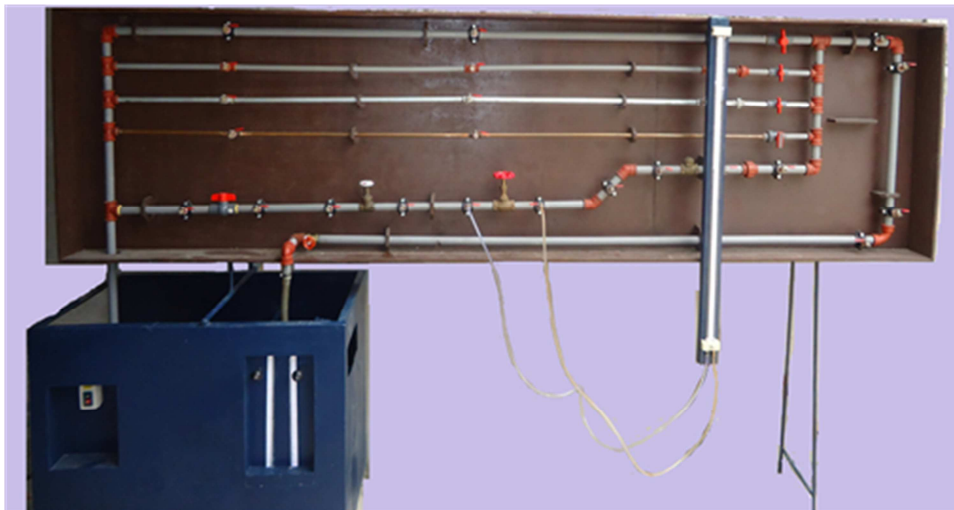


Gráfico N° 61. Tablero de pruebas

1. Un sistema en el cual se obtendrá las pérdida de carga por fricción en tubería de PVC roscable de diámetro nominal 1".
2. Un sistema en el cual se obtendrá las pérdida de carga por fricción en tubería de PVC roscable de diámetro nominal 1/2".
3. Un sistema en el cual se obtendrá las pérdida de carga por fricción en tubería de Hierro galvanizado de diámetro nominal 1/2".
4. Un sistema en el cual se obtendrá las pérdida de carga por fricción en tubería de cobre de diámetro nominal 1/2".
5. Pérdidas de carga en los siguientes accesorios:
 - ✓ Válvula de bola de media vuelta
 - ✓ Válvula de globo

- ✓ Válvula de compuerta.
- ✓ Codo estándar de 45°
- ✓ Válvula de retención o check tipo giratorio convencional.
- ✓ Universal
- ✓ Codo estándar de 90°
- ✓ Codo curvo de 90°

Cada tramo de tubería y accesorio mencionado se encuentra ubicado entre dos tomas de presión (salidas de agua), a los cuales se conecta un manómetro diferencial de agua.



Gráfico N° 62. Manómetro de agua.

El flujo que circula por el circuito es suministrado por una bomba centrífuga de 1 HP de potencia y es regulado por válvulas que conforman el mismo, con el objeto de hacer circular el agua por el ramal deseado.

El caudal se mide mediante aforo, con tanques provisionales a los cuales se encuentran conectados tubos capilares, mismos que esta provisto de una escala que mide el volumen de agua en litros (lt) y el tiempo necesario para llenar un cierto volumen de agua se medirá en segundos (s). Por definición sabemos que caudal es la relación de volumen por unidad de tiempo.



Gráfico N° 63. Sistema de aforo del banco de pruebas.

5.2 Ensayo 1. Coeficiente de rozamiento en tuberías.

5.2.1 Objetivos.

- ✓ Determinar la pérdida de energía por fricción en cuatro ramales de tuberías utilizando un manómetro diferencial de agua.
- ✓ Calcular mediante la fórmula de Darcy-Weisbach el coeficiente de fricción para cada tipo de tubería.
- ✓ Determinar la caudal que fluye por cada ramal de tubería.

5.2.2 Descripción del ensayo.

- a. Encender la bomba y enviar directamente el flujo al ramal de la tubería donde se va a realizar las pruebas.
- b. Conectar las mangueras del manómetro de agua a las tomas de presión (al inicio y al final de cada tramo). Purgar el aire dentro de las mangueras.

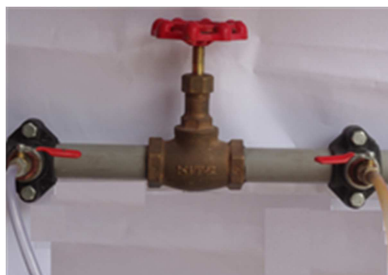


Gráfico N° 64. Conexión de mangueras de manómetro de agua con tomas de presión.

- c. Abrir completamente las válvulas correspondientes de cada trayectoria de flujo con la finalidad de obtener el máximo caudal.
- d. Tomar la diferencia de alturas en los meniscos del manómetro de agua en centímetros Δh .
- e. Determinar el caudal que circula por el tramo de prueba mediante aforo (tubos capilares que se encuentra en el banco hidráulico, que están provistos de una escala que mide el volumen de agua en litros y el tiempo necesario para llenar un cierto volumen de agua se medirá en segundos).
- f. Aplicamos el mismo procedimiento para los demás tuberías.

5.2.3 Cálculo de resultados.

1. Determinar la pérdida de energía en la tubería, la cual está en función de la diferencia de alturas de menisco del manómetro de agua: $\Delta h = h_f = h_1 - h_2$.
2. Determinar el volumen de agua que circula por el tramo pruebas para un cierto intervalo de tiempo (Δt), y calcular el caudal $Q = V / \Delta t$
3. Determinar la velocidad de flujo $v = Q / A$, donde Q es el caudal en (lt/s) sobre segundos, A el área interna de la tubería.
4. Con la viscosidad cinemática adoptada para este ensayo es de $0.000000130 \text{ m}^2/\text{s}$ para una temperatura del agua de 10°C , calcular el número de Reynolds,
5. Calcular la rugosidad relativa (ϵ/D_i). Pero antes será necesario obtener la rugosidad absoluta (ϵ) con la ayuda de la tabla N°3.
6. Determinar la energía cinética para cada toma ($v^2/2g$).
7. Determinar el coeficiente de fricción (f) despejando de la fórmula de Darcy-Weisbach así:

$$f = h_f \cdot \frac{D_i}{L} \cdot \frac{2g}{v^2}$$

5.3 Ensayo 2. Pérdidas de energía en accesorios.

5.3.1 Objetivos.

- ✓ Observar las pérdidas de energía o caída de presión que sufre el flujo al pasar por un accesorio como válvulas, codos etc.
- ✓ Determinar experimentalmente coeficientes de resistencia " k " y longitud equivalente Le/Di para los distintos tipos de accesorios o válvulas.

5.3.2 Descripción del ensayo.

- a. Encender la bomba y enviar directamente el flujo al ramal 5 donde están acoplados los diferentes accesorios en serie.
- b. Conectar las mangueras del manómetro de agua a las tomas de presión (al inicio y al final de cada accesorio). Purgar el aire dentro de las mangueras.
- c. Abrir completamente la válvula de compuerta con la finalidad de obtener el máximo caudal.
- d. Tomar la diferencia de alturas en los meniscos del manómetro de agua en centímetros Δh_m .
- e. Determinar el caudal que circula por el tramo de pruebas mediante aforo (tubos capilares que se encuentra en el banco hidráulico, que están provistos de una escala que mide el volumen de agua en litros y el tiempo necesario para llenar un cierto volumen de agua se medirá en segundos).

5.3.3 Cálculo de resultados.

1. Determinar la pérdida de energía por accesorios, la cual está en función de la diferencia de alturas de menisco del manómetro de agua: $\Delta h_m = h_1 - h_2$.
2. Determinar el volumen de agua que circula por el tramo donde esta acoplada el accesorio para un cierto intervalo de tiempo (Δt), y calcular el caudal $Q = V / \Delta t$.

3. Determinar la velocidad de flujo $v = Q/A$, donde Q es el caudal en (lt/s) sobre segundos, A el área interna de la tubería.
4. Calcular el factor de resistencia K despejando de la ecuación fundamental de la pérdidas de carga por accesorios así:

$$K = \frac{h_m \cdot 2g}{v^2}$$

5. Para la determinación de la longitud equivalente Le/D se debe usar la ecuación de Darcy - Weisbach así:

$$h_f = f \cdot \frac{Le}{Di} \cdot \frac{v^2}{2g} = K \frac{v^2}{2g}$$

Donde las pérdidas por accesorios se pueden expresar en función de una longitud de tubería recta del mismo diámetro nominal que del accesorio.

$$\frac{Le}{Di} = \frac{K}{f}$$

10. Con la obtención del número de Reynolds y la rugosidad relativa obtenemos el coeficiente de fricción f con la ayuda del diagrama universal de Moody (anexo 1). La viscosidad cinemática adoptada para este ensayo es de $0.000000130 \text{ m}^2/\text{s}$ para una temperatura del agua de 10°C .

Tabla N°26. Determinación del coeficiente de pérdidas por fricción de tubería (f).

Trayectorias	Tramo de Tubería	L (m)	Di (mm)	Vol. (m3)	ΔT (s)	Caudal (lt/s)	v (m/s)	Presiones (cm)		$\Delta h = h_f$ (cm)	$f_{\text{experimental}}$	Re	ϵ/D_i	$f_{\text{teórico}}$
								h1	h2					
1	PVC CED 80	1	24.30	15	23.14	0.648	1.398	64.7	52.7	12.00	0.029	26069	2.06E-04	0.025
2	PVC CED 80	1	13.88	15	28.06	0.535	3.533	58.8	34.0	24.80	0.027	37632	3.60E-04	0.023
3	H.G. CED 40	1	15.76	15	25.68	0.584	2.994	71.6	48.6	23.00	0.040	36215	9.52E-03	0.039
4	Cobre tipo "M"	1	14.45	15	27.77	0.540	3.292	60.8	38.7	22.10	0.029	36513	1.04E-04	0.023

Tabla N°27. Determinación del coeficiente de resistencia "K" y longitud equivalente "Le/Di" para diferentes accesorios.

Trayectorias	Accesorio	Di (mm)	Caudal (lt/s)	v (m/s)	Presiones (cm)		$\Delta h = h_m$ (cm)	$K_{\text{experimental}}$	Re	ϵ/D_i	$f_{\text{teórico}}$	(Le/Di) experimental	(Le/Di) teórico
					h1	h2							
6	Válvula Bola	24.30	0.623	1.343	89.4	75.3	14.10	1.534	25038	2.06E-04	0.025	61	150
	Válvula de compuerta				82.2	79.7	2.50	0.272				11	8
	Válvula de globo				99.8	31.8	68.00	7.398				296	340
	Codo estándar 45°				86.5	83.0	3.50	0.381				15	16
	Válvula de retención				64.4	46.1	18.30	1.991				80	50
	Universal				53.8	49.9	3.90	0.424				17	10
	Codo estándar 90°				70.9	63.3	7.60	0.827				33	30
	Codo curvo 90°				42.6	38.3	4.30	0.468				19	20

5.4 Análisis de Resultados.

Si comparamos el coeficiente de pérdidas por fricción experimental con el teórico no difieren significativamente en cada uno de ellos.

Como era de esperarse en las tuberías de PVC y cobre presentan un coeficiente de pérdidas casi similares, debido a que la rugosidad relativa tiene casi el mismo valor.

El codo de 90° presenta más pérdidas de energía, que en los codos de 45° y codo curvo, debido a que el cambio de dirección es más brusco.

El orden de las válvulas que presentan la mayor pérdida de carga en función del coeficiente de resistencia K es la siguiente: válvula de globo ($K = 7.40$) seguida de la válvula de retención ($K = 1.99$) y por último la válvula de bola ($K = 1.53$), lo que concuerda con el criterio de clasificación que dan los manuales de hidráulica.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE COSTOS

6.1 Introducción

En este capítulo se detallarán los costos que implica, la construcción y el ensamblaje del banco de pruebas, con esto se determinará los recursos económicos utilizados. Los costos analizados son:

- ✓ Costos directos.
- ✓ Costos indirectos.

6.2 Costos Directos.

Son aquellos costos que están relacionados directamente con la fabricación o construcción como son: materia prima, herramientas, mano de obra directa, transporte, entre otros.

Tabla N° 28. Costo de materiales utilizados

N°	Material	Unidad	Cantidad	Precio Unitario USD	Precio Total USD
1	Abrazadera acero inoxidable 1"	U	1.0	0.46	0.46
2	Adaptador macho Cu SOHI 1/2"	U	2.0	0.86	1.72
3	Bomba eléctrica, Temco 1 HP	U	1.0	116.24	116.24
4	Broca metálica 3/8	U	3.0	0.80	2.40
5	Bushing reductor HG 1/2" x 1/4"	U	6.0	0.38	2.28
6	Bushing reductor PVC 1/2" x 1/4"	U	23.0	0.82	18.86
7	Codo curvo 90°PVC roscable 1"	U	1.0	4.89	4.89
8	Codo 45°PVC roscable 1"	U	2.0	1.82	3.64
9	Codo 90°PVC roscable 1"	U	5.0	1.14	5.70
10	Codo 90°HG 1"	U	2.0	1.03	2.06
11	Collar derivación salida1/2"	U	17.0	1.37	23.29
12	Fondo para madera	Lt	1.0	7.20	7.20
13	Lija de agua N°120	U	4.0	0.34	1.36

14	Masilla epóxica Rally 50gramos	U	1.0	2.35	2.35
15	Neplo HG 1" x 20cm	U	1.0	1.84	1.84
16	Neplo HG 1/2 x 5cm	U	1.0	0.45	0.45
17	Pintura de caucho Cóndor	Lt	3.0	1.00	3.00
18	Pitón de bronce macho 1/4"	U	2.0	2.25	4.50
19	Planchas de Tol 2mm	U	1.5	52.25	78.38
20	Sellador IPS plus 50cc	U	3.0	4.95	14.85
21	Tableros Plywood 4x8x12 mm	U	3.0	30.30	90.89
22	Te PVC roscable 1"	U	2.0	1.60	3.20
23	Te Cu SOHI 1/2"	U	3.0	5.20	15.60
24	Te HG 1/2"	U	3.0	0.35	1.05
25	Te PVC roscable 1/2"	U	3.0	0.47	1.41
26	Te reductora PVC roscable 1" x 1/2"	U	6.0	2.05	12.30
27	Teflón 1/2" x 10m	U	15.0	0.35	5.25
28	Thinner comercial	Lt	3.0	1.30	3.90
29	Tubería Cobre Tipo M 1/2"	M	2.9	4.52	13.02
30	Tubería PVC roscable 1"	M	11.2	2.26	25.31
31	Tubo Hierro Galvanizado ISO 1/2"	M	4.6	2.04	9.28
32	Universal PVC roscable 1"	U	3.0	4.19	12.57
33	Válvula de bola PVC roscable 1"	U	2.0	3.00	6.00
34	Válvula de bola PVC roscable 1/2"	U	4.0	2.50	10.00
35	Válvula check 1 "	U	1.0	16.50	16.50
36	Válvula compuerta 1"	U	2.0	19.20	38.40
37	Válvula de globo 1"	U	1.0	45.00	45.00
38	Manguera transparente de 1/4"	M	4.0	0.75	3.00
39	Válvula de bola con pitón 1/4"	U	26.0	1.12	29.12
Total					637.26

Tabla N° 29. Costos de mano de obra e instalación

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario USD	Precio Total USD
1	Soldadora eléctrica 200A	Día	5	32	160.00
2	Amoladora	Día	2	10.50	21.00
3	Compresor (pintura)	Horas	5	3.00	15.00
4	Cortado y roscado de la tubería	Día	2	30	60.00
5	Construcción del tablero	Horas	2	5	10.00
Total					266.00

6.3 Costos Indirectos

Son los costos que no intervienen directamente en la construcción: costos de insumos, diseño e ingeniería y mano de obra indirecta.

Tabla N° 30. Costos de Indirectos

N°	Descripción	Precio Total USD
1	Diseño e Ingeniería	200.00
2	Rotulación	10.00
3	Transporte y varios	30.00
Total		240.00

6.4 Costos Total

El costo total resulta de la suma de los costos directos y los costos indirectos. En la tabla N°31 se detalla el costo total del Banco de Pruebas.

Tabla N° 31. Costo Total

N°	Descripción	Precio Total USD
1	Costo de materiales	637.78
2	Costos de mano de obra	266.00
3	Costos indirectos	240.00
Total		1143.78

A través de un análisis económico se puede determinar la inversión que se necesitó en la construcción del equipo, dando una idea con la cual se puede establecer los recursos necesarios para poder renovar los equipos y aparatos que se encuentren en el laboratorio de hidráulica a través de un proyecto de tesis.

6.5 Análisis de costos por operación y mantenimiento.

La operación y mantenimiento del equipo en si no representa ningún problema, debido a que la inversión no es grande comparado con otros equipos mas sofisticados.

La inversión más significativa fue en la construcción tanto del Banco hidráulico como los ramales de tuberías, porque esta conformado por un conjunto de elementos muy engorrosos de ensamblar.

El tanque de almacenamiento de agua debe ser vaciado para evitar la oxidación ya que puede producir fugas o daños, también se debe revisar que no exista basuras en el tanque, para evitar algún daño o problemas con el correcto funcionamiento de la bomba, esto se puede realizar una vez que hayan finalizado las practicas en este equipo y no se necesita volver a realizar en el semestre respectivo.

Se debe revisar la instalación eléctrica así como las conexiones de la bomba, ósea la instalación de succión e impulsión para evitar fugas e ingreso de aire a la bomba.

Un mantenimiento preventivo recomendado debería hacerse cada 6 meses.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- ✓ Se cumplió el objetivo principal que era diseñar y construir un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios.
- ✓ Al estudiar la pérdida por fricción experimentalmente, se concluye que las pérdidas por fricción de tubería (h_f) depende del material con que está construida la tubería, el estado en que está la misma (nueva, usada o muy usada), la longitud, el diámetro y la velocidad de circulación del flujo.
- ✓ Una desventaja que se observó en el banco de pruebas, es que antes de realizar la lectura del diferencial de presión se necesita tiempo para eliminar todo el aire de las mangueras del manómetro con la finalidad de que los valores medidos sean más confiables.
- ✓ Existen varios métodos para obtener el coeficiente de fricción f para los diferentes materiales. Tal es el caso del diagrama de Moody o las fórmulas propuestas por varios científicos como son: Colebrook o Prandtl. En nuestro caso fueron utilizadas las fórmulas, ya que necesitamos mucha exactitud en los cálculos porque se están manejando presiones muy bajas.
- ✓ El coeficiente de resistencia “K” para los accesorios no es constante, va a depender mucho del caudal que se esté manejando y de la geometría utilizada por el fabricante.

7.2 Recomendaciones

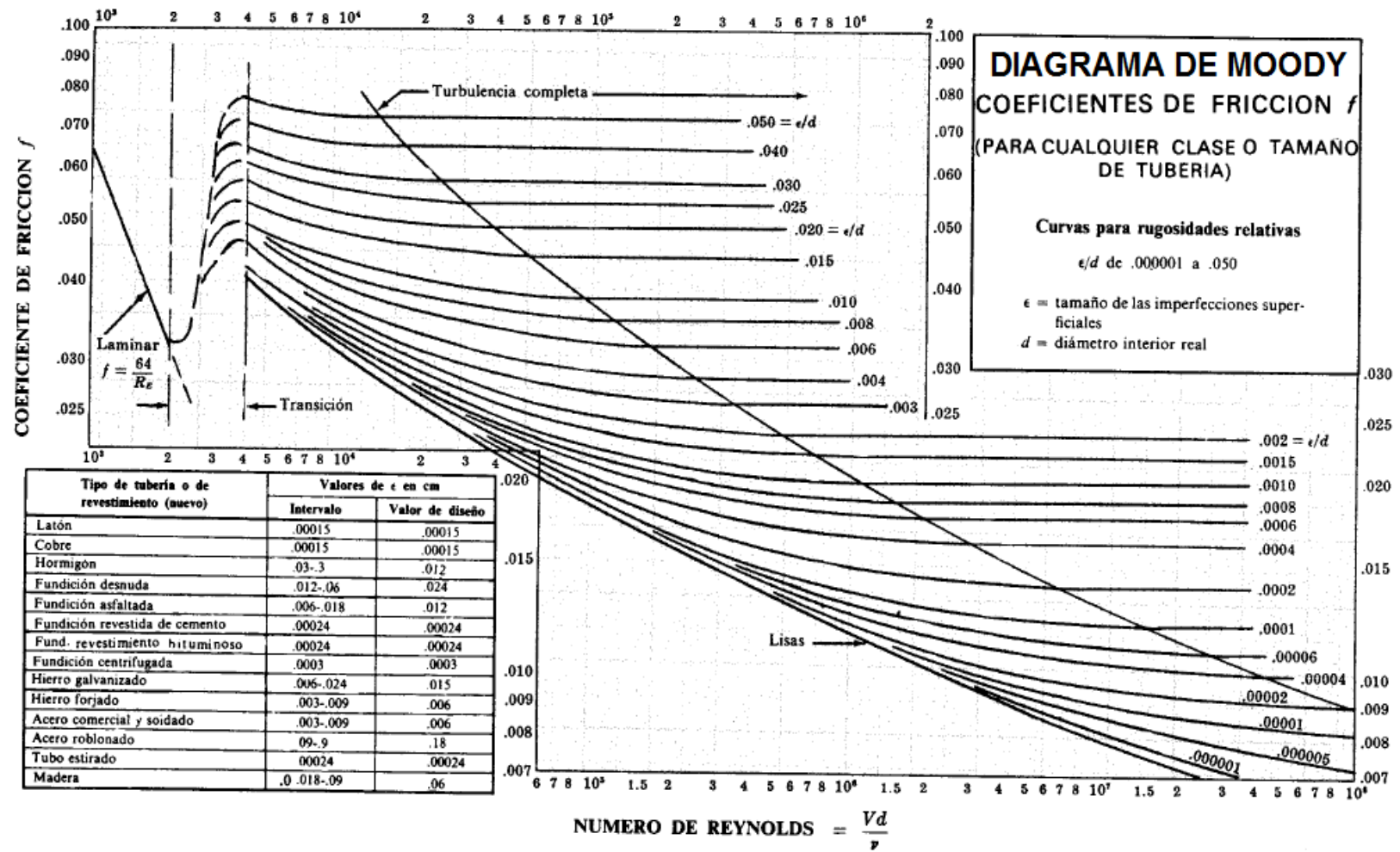
- ✓ Cuando se adquiere algún tipo de accesorio, es preferible que el fabricante proporcione toda la información acerca del accesorio, como por ejemplo el coeficiente de resistencia “K” para utilizarlo correctamente en el diseño.
- ✓ Para la obtención del coeficiente de fricción f , es recomendable que sea lo más exacto posible, ya que de él depende el resultado que se va a obtener del cálculo manual.
- ✓ Cuando se realice el cálculo para seleccionar una bomba debemos considerar un cierto factor de seguridad, con esto evitamos que la bomba trabaje al límite o por debajo de lo deseado.
- ✓ El laboratorista deberá darle el mantenimiento requerido al banco de pruebas: efectuar verificación de uniones, para evitar posteriores fugas, vaciar el tanque de agua cuando no se utilice, para evitar la corrosión en el impulsor de la bomba, en las válvulas de bronce y acumulaciones de suciedad dentro de las tuberías.
- ✓ La correcta operación del equipo, en especial en abrir o cerrar las válvulas adecuadas es importante para un buen funcionamiento y el adecuado desarrollo de los ensayos.

BIBLIOGRAFIA

1. RODRIGUEZ DÍAZ, Héctor Alfonso. Diseños hidráulicos sanitarios y de gas en edificaciones. Tercera edición. Colombia. Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería. 2011. Pág. 223
2. MOTT, Robert. Mecánica de Fluidos. Sexta Edición. Editorial Prentice Hall. México. 2006. Pág. 644
3. LÓPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda edición. Colombia. Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería. 2011. Pág. 546
4. SILVA CUISANA, Milton Vinicio. Manual de Mecánica de Fluidos. Primera edición. Editorial Universitaria. Quito-Ecuador. 1980. Pág. 240
5. SOTELO AVILA, Gilberto. Hidráulica General. Volumen I. Editorial Limusa, S.A. Sexta edición. México. 1997. Pág. 542
6. STREETER, Víctor. Mecánica de los fluidos. Tercera Edición. Editorial Mc Graw-Hill. México. 1988. Pág. 594
7. GILES, Ronald. Mecánica de los fluidos e hidráulica. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill (SCHAUM). Pág. 280
8. SHAMES Irving H. Mecánica de fluidos. Tercera Edición. Editorial Mc Graw Hill. Colombia. 1995. Pág. 830
9. http://www.unioviedo.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/_asignaturas
10. http://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_antirretorno

ANEXOS

ANEXO N°1 DIAGRAMA UNIVERSAL DE MOODY



ANEXO N°2

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

Temperatura	Masa Específica	Peso Específico	Presión de Vapor	Viscosidad Dinámica	Viscosidad Cinemática
T °C	ρ kg/m ³	γ N/m ³	P_v^{abs} Pa	μ 10 ⁻³ kg/m.s	ν 10 ⁻⁶ m ² /s
0	999,9	9805	611	1,79	1,79
5	1000,0	9806	873	1,52	1,52
10	999,7	9803	1266	1,31	1,31
15	999,1	9798	1707	1,14	1,14
20	998,2	9789	2335	1,01	1,01
25	997,1	9779	3169	0,89	0,90
30	995,7	9767	4238	0,80	0,80
35	994,1	9752	5621	0,72	0,73
40	992,2	9737	7377	0,66	0,66
45	990,2	9720	9584	0,60	0,61
50	988,1	9697	12331	0,55	0,56
55	985,7	9679	15745	0,51	0,51
60	983,2	9658	19924	0,47	0,48
65	980,6	9635	25015	0,44	0,44
70	977,8	9600	31166	0,41	0,42
75	974,9	9589	38563	0,38	0,39
80	971,8	9557	47372	0,36	0,37
85	968,6	9529	57820	0,34	0,35
90	965,3	9499	70132	0,32	0,33
95	961,9	9469	84552	0,30	0,31
100	958,4	9438	101357	0,28	0,30

ANEXO N°3
PRESIÓN ATMOSFÉRICA A DIFERENTES ALTITUDES SOBRE EL
NIVEL DEL MAR

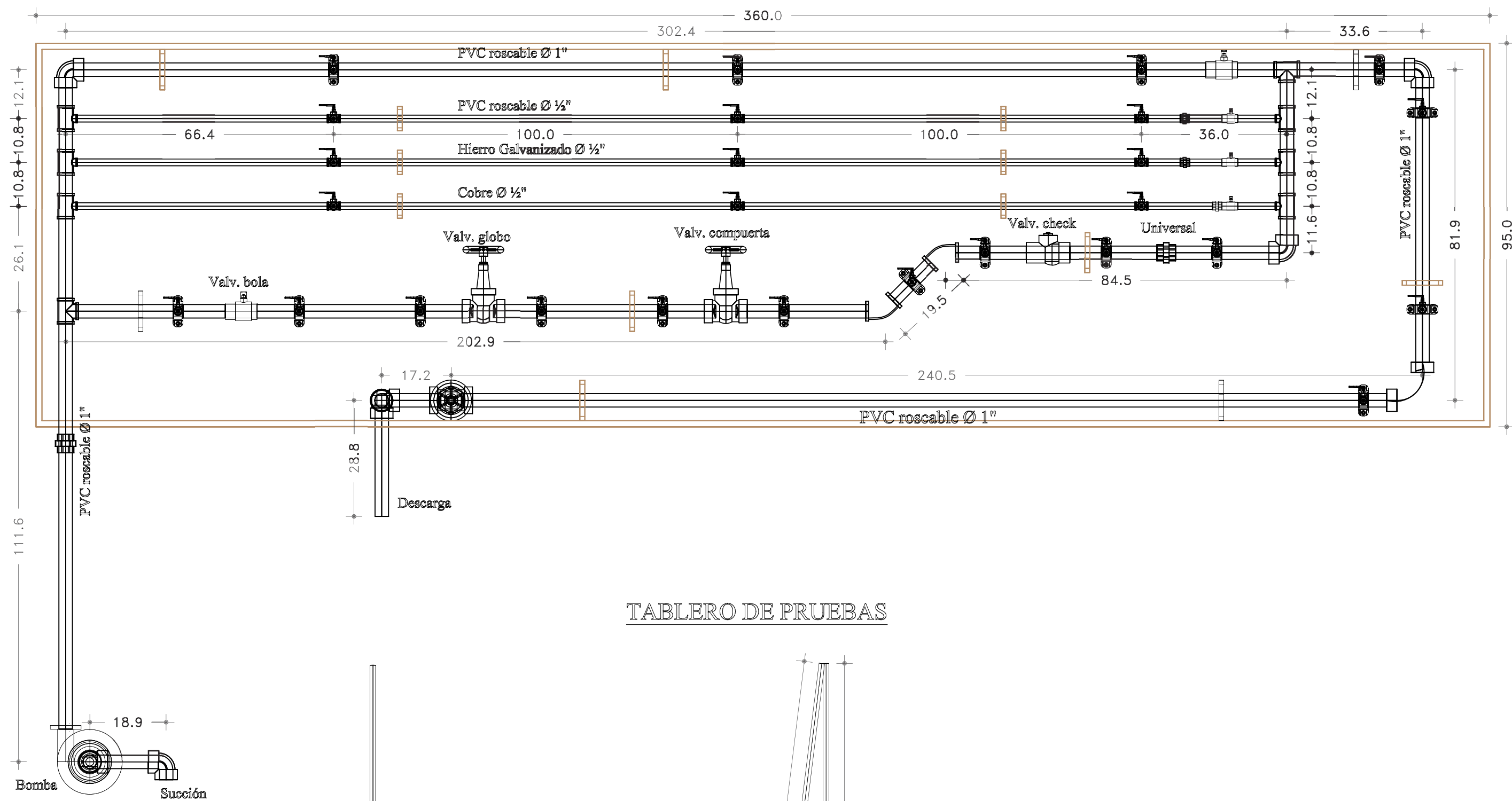
Altura sobre el nivel de mar (m)	Presión atmosférica (Kg/cm ²)	Observaciones
-400	1,082	Valores de la Presión atmosférica obtenidos en base a regresión Parabólica, con la Siguiete _ecuación: $Y = a + bX + cX^2$ $a = 1,0326$ $b = -0,0001$ $c = 4,7890 \times 10^{-9}$
-200	1,057	
0	1,033	
200	1,009	
400	0,985	
600	0,962	
800	0,939	
1000	0,917	
1200	0,894	
1400	0,873	
1600	0,851	
1800	0,831	
2000	0,810	
2200	0,799	
2400	0,770	
2600	0,751	
2800	0,732	
3000	0,713	
3200	0,695	
3400	0,677	
3600	0,659	Valores aproximados para condiciones climáticas normales
3800	0,642	
4000	0,626	
4200	0,609	
4400	0,593	
4600	0,578	
4800	0,563	
5000	0,548	
5200	0,533	
5400	0,519	
5600	0,506	
5800	0,492	
6000	0,480	

ANEXO N° 4
TENSIÓN DEL VAPOR DE AGUA

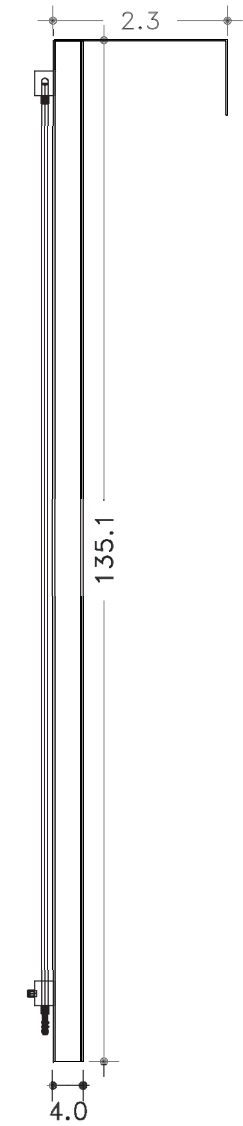
Temperatura (°C)	Tensión de vapor (Kg/cm²)	Peso específico (Kg/Lt)
0	0,0062	
5	0,0089	
10	0,0125	1,00000
15	0,0174	0,99805
20	0,0238	0,99717
25	0,0323	0,99603
30	0,04327	0,996
35	0,0573	
40	0,0752	0,992
45	0,09778	
50	0,1258	
55	0,1605	
60	0,2031	0,983
65	0,2550	
70	0,3177	
75	0,3931	
80	0,4828	0,972
85	0,5895	
90	0,7149	
95	0,8619	
100	1,0333	0,959

ANEXO N°5
FOTOS DEL BANCO DE PRUEBAS

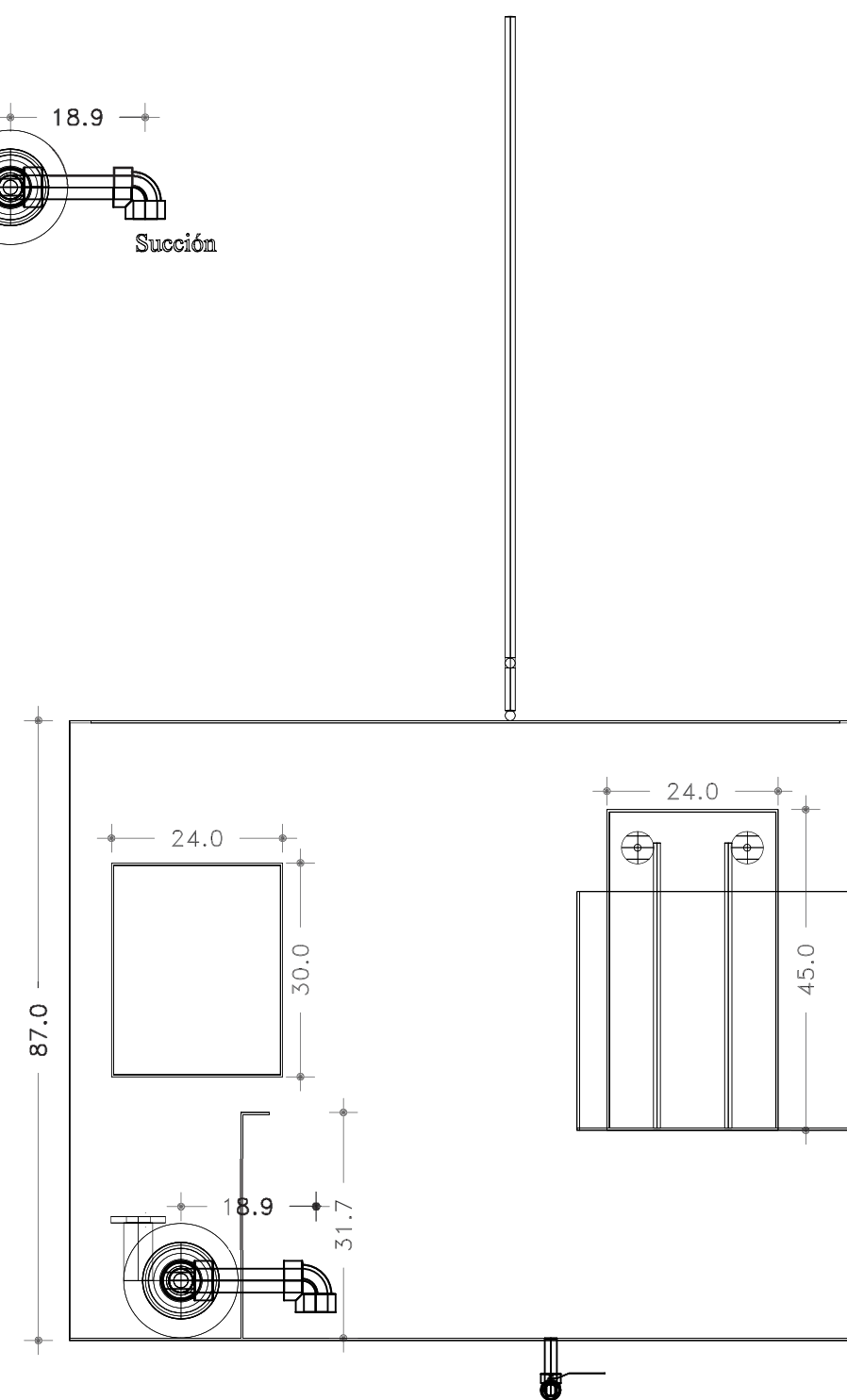




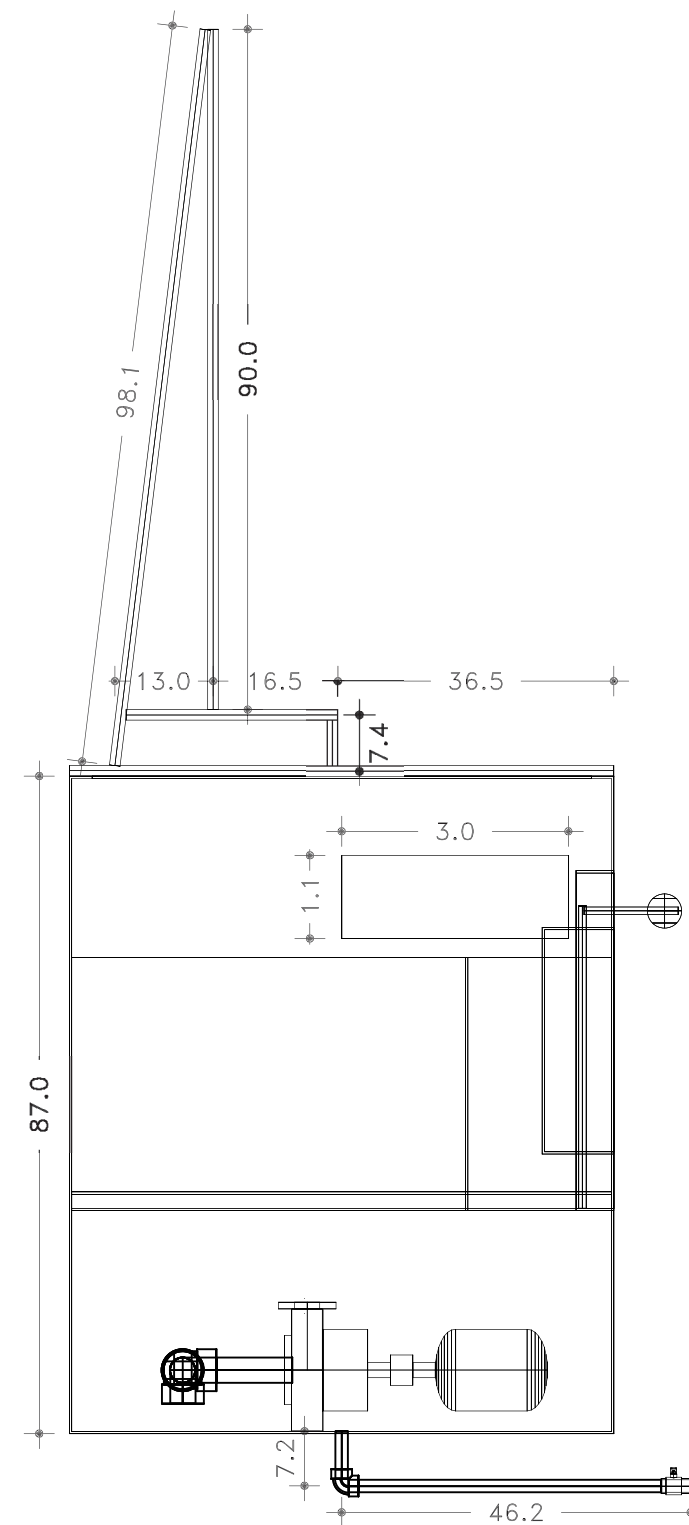
TABLERO DE PRUEBAS



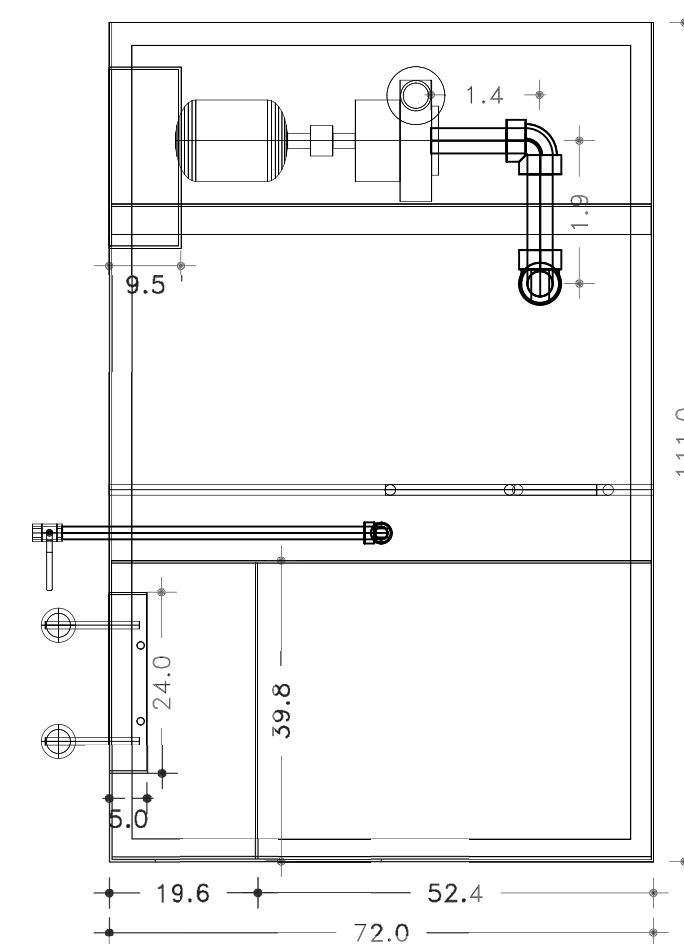
MANÓMETRO DE AGUA



VISTA FRONTAL




VISTA LATERAL



VISTA EN PLANTA

BANCO HIDRÁULICO

			UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL		
PROYECTO: BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE PERDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS					
DISEÑO: YAMBOMBO GUANUTAXI JAVIER G.		DIBUJO: YAMBOMBO G. JAVIER G.			
REVISION: Ing. MITON SILVA		ESCALA: 1 : 10		FECHA: 2012-08-15	
CONTIENE: BANCO HIDRÁULICO, TABLERO DE PRUEBAS - MANÓMETRO DE AGUA				LÁMINA: 1/10	